



Lidor. Acquisition, traitement et analyse d'images LiDAR pour la modélisation des paléo-reliefs de la plaine littorale du Languedoc oriental.

Laure Nuninger, Krištof Oštir, Ziga Kokalj, Ales Marsetic

► To cite this version:

Laure Nuninger, Krištof Oštir, Ziga Kokalj, Ales Marsetic. Lidor. Acquisition, traitement et analyse d'images LiDAR pour la modélisation des paléo-reliefs de la plaine littorale du Languedoc oriental.. 2008, pp.95. halshs-00483129

HAL Id: halshs-00483129

<https://shs.hal.science/halshs-00483129>

Submitted on 27 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.

Rapport d'ATIP jeunes chercheurs

LIDOR

*Acquisition, traitement et analyse d'images LiDAR
Pour la modélisation des paléo-reliefs
de la plaine littorale du Languedoc oriental*

L. Nuninger* dir.
K. Oštir**, Ž. Kokalj **, A. Marsetič**

* LEA ModelTER, Laboratoire de Chrono-Environnement UMR 6249,
MSH C.N. Ledoux USR 3124 (Besançon, France)

** LEA ModelTER, Institut d'Etudes Anthropologiques et Spatiales (Ljubljana, Slovénie)

Remerciements

Nous tenons à vivement remercier tous les collègues et collaborateurs qui ont participé au projet d'acquisition et au traitement des données

Sandra Aussel, ingénieur d'étude contractuelle à la MSH de Dijon, pour son aide technique lors des post-corrections GPS

Vincent Bichet, maître de conférence en géologie, Université de Franche-Comté UMR 6249, pour le prêt du matériel de terrain

Philippe Blanchemanche, ingénieur de recherche CNRS UMR 5140, pour son aide et sa disponibilité lors des missions de terrain et d'acquisition des données Lidar.

Daniel Charraut, chargé de recherche au CNRS UMR 6417, pour son aide et sa disponibilité concernant l'utilisation du protocole de filtrage directionnel qu'il a mis au point avec F. Favory et Ph. Jourdain.

Francis Coulomb et Bernard Pagès, bénévoles retraités, pour leur aide, leur disponibilité et les bons produits du terroir dégustés lors de notre mission de terrain.

Erik Doerflinger, ingénieur de recherche, spécialiste des mesures GPS, contact pour la station de Montpellier du Réseau GPS Permanent, UMR 5573 - CNRS / Université de Montpellier II.

François Favory, professeur d'archéologie métropolitaine, Université de Franche-Comté, UMR 6249, pour la mise à disposition de toute sa documentation et sa disponibilité.

Claude Raynaud, chargé de recherche CNRS UMR 5140, pour la mise à disposition de sa documentation et pour son accueil amical lors de notre mission de terrain ainsi que ses parents pour le prêt de leur gîte.

Jean-Claude Roux, ingénieur au service régional de l'archéologie de Languedoc-Roussillon, UMR 5140, pour son aide technique et le prêt du matériel de terrain

François-Pierre Tourneux, maître de conférence en géographie, Université de Franche-Comté UMR 6049, pour son aide technique sur Erdas Imagine.

Murielle Leroy, Laure Koupaliantz, Pierre Nouvel, Vincent Guichard, Franck Faucher, Laure Saligny, Pascal Depaepe, Yves Menez et Thierry Lohro pour leur participation à l'enquête menée sur les projets Lidar appliquée à l'Archéologie en France.

Le réseau ISA, plate forme technologique du CNRS, pour le prêt des GPS qui ont servi au relevé des points de contrôle

1	Projet LIDOR : Acquisition, traitement et analyse d'images LiDAR pour la modélisation des paléo-reliefs de la plaine littorale du Languedoc oriental	7
1.1	Contact	7
1.2	Objectifs scientifiques du projet LIDOR (rappels)	7
1.3	Crédits obtenus pour 2 ans (mai 2005 - mai 2007)	8
1.4	Bilan des résultats par rapports aux objectifs du projet	9
1.5	Présentations & Publications communes	9
2	Rapport scientifique	11
2.1	L'acquisition des données LiDAR	11
2.1.1	LiDAR: Light Detection and Ranging	11
2.1.2	Les principes du LiDAR	12
2.1.3	Les avantages et les limites du LiDAR	13
2.1.4	Etat de l'art en archéologie.....	14
2.1.5	Du projet à la commande des données: ce que l'on découvre et ce qu'il faut savoir... ..	17
2.1.6	L'acquisition : préparation & mission	18
2.1.7	Les données	19
2.2	Traitements des données Lidar, des points aux fichiers raster	21
2.2.1	LASEdit.....	22
2.2.2	Traitements des données et résultats	24
2.3	Analyses et interprétations archéologiques	27
2.3.1	Reconnaissance et photo-interprétation	27
♦	Observations sous couvert végétal	27
♦	Observations de chemins ou de limites parcellaires disparues	30
♦	Détection de paléochenaux.....	33
2.3.2	Analyses spatiales en développement et cas d'études.....	35
♦	Cas d'étude 1 : Sud-est du village de Mauguio	35
♦	Cas d'étude 2 : St-Denis de Genestet et la vallée du Berbian.....	39
2.4	Conclusions	42
	Bibliographie	43
	Annexes	45
	Table des figures	93
	Table des annexes.....	95

1 **Projet LIDOR : Acquisition, traitement et analyse d'images LiDAR pour la modélisation des paléo-reliefs de la plaine littorale du Languedoc oriental**

1.1 **Contact**

Laure Nuninger, laure.nuninger@univ-fcomte.fr

1.2 **Objectifs scientifiques du projet LIDOR (rappels)**

Avec le développement des recherches archéologiques sur le peuplement et principalement sur la dynamique des relations sociétés/milieus, la **spatialisation des données paléoenvironnementales** devient un enjeu majeur pour faire évoluer les problématiques. En effet, les approches régionales et micro-régionales qui ont pu être développées jusque là, dans le cadre du programme européen Archaeomedes¹ et du PCR Berry Antique² par exemple, sont pour l'essentiel fondées sur des données environnementales actuelles. Or, malgré leur intérêt, nous savons qu'elles ne sont pas satisfaisantes pour aborder les rapports de l'homme à son milieu de vie, au cours de la préhistoire jusqu'au Moyen Age, car le paysage est, par définition, une donnée dynamique.

Cela est particulièrement le cas dans les **zones de plaine littorale et de delta** qui sont soumises alternativement à de fortes sédimentations ou au contraire à des processus d'incisions. Une telle dynamique en Languedoc oriental a entraîné une modification importante de la topographie qui de légèrement vallonnée au cours de la préhistoire est devenue totalement plane aujourd'hui métamorphosant le potentiel et les contraintes environnementales de cet espace. Dans ces conditions, appréhender l'évolution du système de peuplement suppose une meilleure compréhension globale de la dynamique topographique que nous nous proposons d'aborder dans le cadre de ce projet à travers une **modélisation des paléo-reliefs de la plaine littorale du Languedoc oriental** située entre Nîmes et Montpellier (cf. Figure 1, ci-après).

Le principal **objectif de notre projet** consiste dans l'élaboration de plusieurs modèles numériques de terrain (MNT) s'attachant à décrire le plus vraisemblablement possible la topographie à différentes périodes de la Protohistoire au Moyen Age. Il s'agit ainsi de :

1. Nuancer le MNT actuel sur lequel se fonde, par défaut, l'essentiel des recherches
2. Fournir une base de données topographiques modélisées permettant une analyse spatiale des vestiges archéologiques intégrant nos connaissances du paléoenvironnement en amont des analyses. En effet, en l'état actuel, elles sont uniquement mobilisées en aval, dans la phase d'interprétation des résultats.
3. Spatialiser les données paléoenvironnementales par définition ponctuelles (sondages, carottages) à l'aide des outils de télédétection, de traitement d'image et d'analyse spatiale.

¹ Archaeomedes I (1992-1994) : *Understanding natural and anthropogenic causes of soil degradation and desertification in the mediterranean basin*, Contrat EV5V-0021, au titre de la Direction Générale XII de la Commission des Communautés Européennes – Science, recherche et développement, Programme Environnement (IV.3 Désertification des régions méditerranéennes). Archaeomedes II (1996-1999) : *Policy-relevant models of the natural and anthropogenic dynamics of degradation and desertification and their spatio-temporal manifestations*, DG XII de la Commission des Communautés Européennes – Science, recherche et développement, Programme Environnement (IV.3 Désertification des régions méditerranéennes), contrat ENV4-CT95-0159 (coord. S. van der Leeuw)

² Le Berry antique : milieu, hommes, espaces (1997-2000), Projet Collectif de Recherche (coord. O. Buchsensschutz, F. Dumasy)

4. Se donner les moyens d'expérimenter de nouvelles méthodes pour définir un protocole de recherche réaliste et plus ambitieux pour la poursuite des travaux de recherche sur les interactions sociétés/milieus dans les basses plaines littorales et alluviales³.

Ainsi avec ce projet, nous voulons poursuivre l'effort d'analyse des interactions sociétés/milieus dans la très longue durée⁴, avec une approche pluridisciplinaire associant des chercheurs des sections 31, 32, 39, un géodésiste et un physicien spécialiste du traitement d'images, spectrales et radar.

Les méthodes envisagées concernent :

1. L'acquisition par mission aérienne et le traitement de données LiDAR (images aériennes géoréférencées, obtenues par télémètre laser embarqué et système de localisation GPS)
2. L'analyse statistique et spatiale, dans un Système d'Information Géographique (SIG) intégrant les données géographiques, planimétriques, archéologiques et paléoenvironnementales pour en permettre une modélisation cohérente à l'échelle micro-régionale.
3. La reconnaissance de terrain, le traitement et l'analyse des données géoarchéologiques et géomorphologiques, centrés sur les anomalies observées dans l'analyse d'image pour la modélisation spatiale des phases d'incision ou de sédimentation alluviale et des comblements deltaïques, par période (à l'échelle régionale, pour simuler les paléo-reliefs majeurs et à l'échelle micro-régionales pour les paléo-reliefs mineurs).
4. La confrontation des indicateurs de paléoécologie végétale avec les indices de paléo-reliefs, par simulation de la distribution spatiale des espèces et le calcul de leurs fréquences théoriques comparées aux fréquences observées dans les spectres anthracologiques et palynologiques.

Axes prioritaires du CNRS : *a)* environnements, homme et sociétés : de la reconstruction du passé aux modèles prospectifs, *b)* modélisation en SHS

1.3 Crédits obtenus pour 2 ans (mai 2005 - mai 2007)

Demandés:

	Année 1	Année 2	TOTAL H.T.
Missions (réunions et terrain)	2 000	3 000	5 000
Autres: acquisition de données LiDAR (20 km ²)	25 000		25 000
Autres: analyses C ¹⁴	500	1 000	1 500
TOTAL H.T.			31 500

Obtenus:

	Année 1	Année 2	TOTAL H.T.
Missions (réunions et terrain)		700	700

³ Suite au projet *le littoral languedocien durant l'Holocène : milieu et peuplement entre Lez et Vidourle (Hérault, Gard)* (1998-2002) Programme Environnement, Vie et Société, CNRS (coord. Ph. Blanchemanche) et en complément du nouveau programme Programme *DYLIT: Dynamiques littorales, climat et sociétés entre Aude et Petit-Rhône (Languedoc) depuis 8000 ans, d'après des sources biophysiques et textuelles* (2004-2007), programme Eclipse II, CNRS (coord. Ph. Blanchemanche et L. Chabal).

⁴ Suite aux projets *Archaeomedes I et II* et *Resiliency in Past Landscapes* (2001-2004), funded by the McDonnell Foundation (coord. S. van der Leeuw, A. Kinzig, et Ch. Redman).

Autres: acquisition de données LiDAR (20 km ²)		19 000	19 000
Autres: analyses C ¹⁴			
Autres: intranet, serveur ftp		300	300
TOTAL H.T.			20 000

Justification:

Les crédits obtenus ont pour l'essentiel servi à financer la campagne d'acquisition de données LiDAR commandée à la société HELIOGS après un appel d'offre déposé sur le service des marchés du CNRS PUMA. HELIOGS était la seule société qui nous permettait d'acquérir un minimum de 35 km² de données LiDAR avec des images hyperspectrales pour moins de 20 000 euros H.T.

Le reste des crédits a été utilisé pour financer: la mise en place et location d'un intranet-serveur FTP pour la sauvegarde et l'échange des données (le poids total des fichiers bruts s'élevant à près de 120 Go), une mission de relevés GPS de points de contrôle nécessaires à la société HELIOGS ainsi qu'une mission pour l'accueil et le suivi de la mission d'acquisition proprement dite.

1.4 Bilan des résultats par rapports aux objectifs du projet

Par rapport aux objectifs annoncés et compte tenu des financements disponibles, seuls les étapes 1 et 2 du projet ont pu être réalisées. En effet, compte tenu du projet initial :

- le financement total accordé de 20000 euros par rapport à celui demandé de 25000 euros pour la seule acquisition des données, nous a contraints à réduire au maximum notre demande de service auprès des fournisseurs et à prendre en charge toute la campagne de terrain préalable au vol (relevés de points de contrôles) ainsi que tous les prétraitements des données brutes (réalisation des Modèle Numérique de Surface – DSM –, Modèle Numériques de Terrain – DTM – ainsi que celle de l'image d'intensité).
- nous avons également dû revoir les zones d'études préalablement envisagées pour des raisons budgétaires. En effet, afin de réduire les coûts d'acquisition, nous devions travailler sur une seule zone et de préférence sous la forme d'un transect de 2,5 km de large pour réduire le nombre de passages de l'hélicoptère. Toutefois, ce nouveau découpage et les négociations menées avec les fournisseurs de données ont finalement permis l'acquisition sur un espace de 40 km², soit deux fois plus que ce qui était initialement prévu.
- L'essentiel du coût de l'opération étant lié au déplacement de l'avion ou de l'hélicoptère, il faut également noter qu'il n'était pas possible de réduire la ligne budgétaire d'acquisition Lidar au profit des autres postes prévus initialement notamment, les frais de terrain et de datation C¹⁴ liés aux étapes 3 et 4 du projet.

1.5 Présentations & Publications communes

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

Ostir, Nuninger 2006 : K. OSTIR, L. NUNINGER, Paleorelief detection and modelling a case of study in eastern Languedoc (France). In: Campana, S., Forte M. (eds.), proceeding of the 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology, December 4-7, 2006, *From Space to Place*, BAR International Series 1568, Archaeopress, 2006.

2 Rapport scientifique

Recentrée sur l'acquisition et le traitement des données Lidar, notre enquête se développe selon deux axes méthodologiques et thématiques. L'ensemble des données Lidar acquises a pu être traité pour produire un premier Modèle Numérique de Terrain puis de Surface à 50 cm de résolution qui ont permis une exploration visuelle des données. Les données étant extrêmement lourdes à manipuler, il convient d'abord de développer et de tester l'analyse sur une fenêtre réduite pour la généraliser ensuite en utilisant un serveur de calcul dédié. D'un point de vue thématique, le travail de l'équipe se concentre sur le traitement des données avec trois objectifs principaux : la détection des aménagements de la plaine (irrigation, drainage...) depuis l'Antiquité ; la mise en évidence du réseau hydrographique « naturel » avant le détournement artificiel des cours d'eau et l'assèchement des dépressions humides ; la détection des microreliefs résiduels. Il est important de souligner que ces thématiques ont déjà fait l'objet de nombreux travaux fondés sur un autre type de documentation depuis les années 80 (Delafolie I. et al. 1990, Favory, Malvis et al. 1993, Favory and Raynaud 1992, Favory, Raynaud et al. 1993, Raynaud, Berger, and Fiches 1999) Ainsi, les connaissances enregistrées au préalable permettent de valider la démarche opérée sur les données LIDAR.

Compte tenu des objectifs thématiques et des contraintes techniques, la reconnaissance visuelle que nous présenterons à travers quelques illustrations, nous a permis de définir trois micro-zones d'études pour pousser les analyses, tester et mettre au point un protocole analytique. Ce protocole en cours de formalisation sera abordé à travers la présentation des trois cas d'étude retenus. Toutefois avant d'exposer ces premiers résultats, ce rapport présentera de manière détaillée ce qu'est la technologie Lidar, son fonctionnement, les données obtenues et leur traitement pour obtenir une information utile à l'archéologue. On insistera notamment sur les aspects techniques et pratiques qui doivent être maîtrisés pour définir au mieux un projet d'acquisition pour une problématique archéologique.

2.1 L'acquisition des données LiDAR

2.1.1 LiDAR: Light Detection and Ranging

Depuis quelques années, la télédétection lidar focalise de plus en plus l'attention. Le LiDAR "Light Detection and Ranging" est le nom donné à la fois à une méthode de mesure et à l'appareil qui sert à faire cette mesure. En français, on retrouvera le nom de la méthode sous la forme "altimétrie laser aéroportée" ou "laser scanning". L'utilisation du laser pour mesurer la distance a été découverte dès les années 60. La plupart des hommes de chantier utilisent cette technologie pour mesurer des distances électronique à l'aide d'instruments indépendants dès les années 70 ou de station totale depuis les années 80. Parallèlement, dans les années 70, plusieurs agences ont mis au point des capteurs de type Lidar pour réaliser des mesures océanographiques et topographiques. Mais ce n'est qu'à partir des années 90, avec le développement des techniques GPS On-The-Fly (OTF), la baisse relative du coût du système et la possibilité de le rendre mobile, qu'il est possible de commercialiser la technologie et des capteurs montés sur une plate forme aéroportée pour un résultat avec une précision et des performances qui ne cessent d'augmenter depuis. Ainsi, le nombre mondial de fournisseurs de données Lidar est passé de 3 en 1995 à environ 50 en 2000 et il est maintenant de plusieurs centaines, ce qui explique une certaine démocratisation des projets d'acquisition et une conquête rapide de nombreux champs d'application tels que la gestion de l'énergie, l'agriculture, la gestion forestière, la protection du littoral, l'aménagement urbain, les communications et l'archéologie.

2.1.2 Les principes du LiDAR

Le principe de la technologie lidar est de répéter des mesures de distance à un objet à l'aide d'un télémètre laser. Le télémètre envoie un faisceau lumineux qui est interrompu par l'objet. Comme la vitesse de la lumière est connue, il suffit de mesurer le temps que la lumière du faisceau met jusqu'à l'objet pour connaître la distance qui le sépare de la source émettrice du faisceau. La distance est donc calculée à partir de la différence de temps entre l'émission de l'impulsion laser et la réflexion du signal lumineux reçu. Le fait de pouvoir répéter les mesures permet ensuite d'obtenir une description précise de l'objet sous la forme d'un nuage de points renseignés par des coordonnées x , y et z , si on connaît par ailleurs la position exacte de la source émettrice (Figure 1). Dans le cas des observations lidar aéroportées, la plupart des systèmes dépassent largement les capacités des systèmes de télédétection optique tant en termes de résolution (avec plus de 10 points de réflexion par m^2) que de précision dans la localisation avec une erreur absolue de l'ordre de 10 cm, voire moins. Pour atteindre une telle précision, les systèmes lidar sont associés au système de géolocalisation par satellite *Global Positioning System* (GPS) et à une unité de mesure inertielle (IMU). Ces unités de mesure inertielle qui enregistrent l'accélération et l'angle du système dans l'espace sont des aides précieuses à la navigation car elles offrent un positionnement relatif très précis, intermédiaire aux relevés de position absolue (GPS).

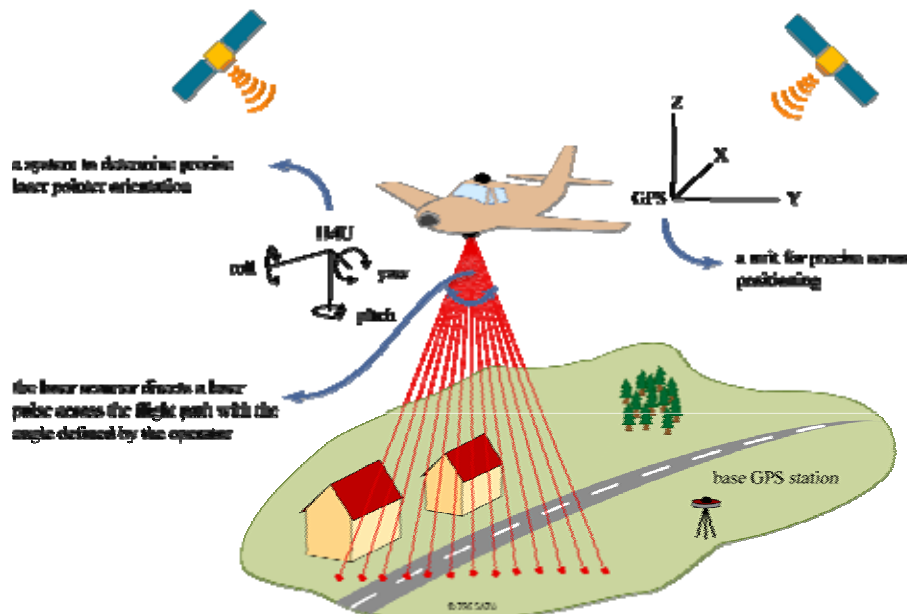


Figure 1 Acquisition des données Lidar (source : ZRC SAZU)

L'appareil Lidar émet des impulsions infrarouge laser très rapides en direction du sol avec un système de balayage grâce à un miroir oscillant qui permet de couvrir l'espace survolé selon un angle donné (Figure 1). Le récepteur qui capte le signal retour discrimine ensuite ce signal en fonction de la réflectance du sol, de la végétation ou des structures touchées par le faisceau lumineux et enregistre l'intervalle de temps écoulé entre les signaux transmis et reçus. La distance qui sépare le sol et la plate-forme aéroportée est ensuite déterminée à partir de cette information. Alors qu'en vol, le système recueille des informations sur la base d'une vaste quantité de points dispersés et les stocke dans un format numérique, l'interface d'unité de mesure inertielle (IMU) enregistre le tangage, le roulis et la position de la plate-forme. Dans le même temps, un système GPS embarqué permet d'enregistrer la position exacte de l'avion. Les plate-formes Lidar peuvent également comprendre d'autres capteurs de type

photographique, multispectral ou hyperspectral qui permettent une acquisition simultanée de données d'imagerie.



Figure 2 - Exemple de matériel composant une plate-forme Lidar (de gauche à droite): écran de contrôle pour la gestion du système de navigation (CCNS), unité d'enregistrement des données, scanner laser, l'unité de gestion du laser, l'unité de mesure inertielle (IMU), et la plate-forme permettant d'absorber les chocs. L'image montre le système d'acquisition LiteMapper 5600.

Après l'acquisition, les données Lidar brutes et les données de l'unité de mesure inertielle sont combinées avec celles du système de positionnement GPS pour permettre le calcul rigoureux des valeurs x, y, z et d'intensité de chaque point. Les résultats seront fournis sous la forme de fichiers numériques au format ascii. Ce sont ces fichiers qui peuvent être affichés sur l'écran de l'ordinateur à l'aide de logiciels appropriés, puis édités et traités pour générer des modèles de surface, des modèles d'élévation, et de contours (2.2 - Traitements des données Lidar, des points aux fichiers raster)

2.1.3 Les avantages et les limites du LiDAR

Les systèmes de cartographie laser sont en mesure de collecter de manière très rapide et très précise des données topographiques sans avoir besoin d'un vaste panel de points de contrôle ou de grands réseaux type Réseau Géodésique Français (RGF). Seule une station de contrôle au sol située à moins de 30 km de la zone scannée est nécessaire, ainsi que quelques contrôles enregistrés au préalable pour recalibrer le système en cas de problème (2.1.6 - L'acquisition : préparation & mission). En fonction de la hauteur de vol, de la largeur, de l'angle de balayage, et de la fréquence des impulsions, le nombre de points enregistrés peut varier d'un maximum de 100 points par mètre carré à un point pour plusieurs mètres carrés. Par rapport à la photogrammétrie, la cartographie laser a l'avantage d'être possible de jour comme de nuit et l'acquisition des données n'est pas dépendante de l'angle du soleil.

Enfin, la possibilité de scanner des zones difficilement accessibles et la capacité du laser à pénétrer le couvert forestier constituent un des apports essentiels de la technologie lidar. En effet, tandis qu'il nous est possible de produire de l'information sur les modifications du paysage à partir de la télédétection optique, par exemple, l'interprétation de photos aériennes et l'utilisation d'images optiques, en particulier dans les pays boisés, donnent des résultats très limités parce que de nombreux vestiges du paysage passé sont envahis par la végétation. Au contraire, le laser permet de pénétrer le couvert végétal en ce sens qu'un même faisceau laser peut renvoyer plusieurs retours. Ainsi, la lumière émise par un même faisceau pourra être en partie interrompue et réfléchi par le feuillage, tandis qu'une autre partie pourra atteindre des

branches, le tronc ou encore le sol lui-même. On distingue alors plusieurs retours ou échos (*first pulse* – premier écho, *last pulse* – dernier écho) pour une même impulsion (Figure 3).

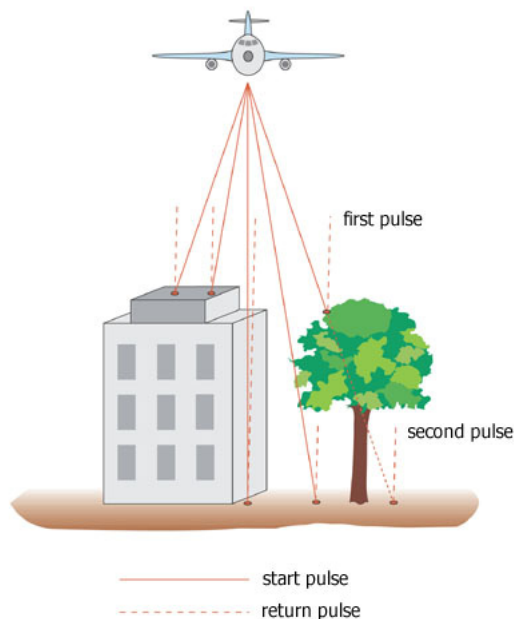


Figure 3 - Résultat de différentes impulsions laser
(source : Terra Imaging, <http://www.terraimaging.de/index.php?id=231>)

Malgré ses nombreux avantages, cette technologie comporte également plusieurs limites. Tout d'abord les capteurs lidar ne peuvent enregistrer des données que dans de bonnes conditions météorologiques sans pluie, sans brouillard, sans fumée, sans neige. La plate-forme aéroportée doit se situer obligatoirement en dessous des nuages. Dans les zones où la couverture végétale est très dense, dans la plupart des cas, les impulsions lidar ne seront pas en mesure de pénétrer à travers le feuillage pour atteindre le sol. Enfin, dans tous les cas, les données d'imagerie associée (photos numériques ou images satellitaires) seront nécessaires pour analyser le nuage de points, réaliser une classification très précise de la végétation afin de produire des modèles numériques de terrain et de surface prenant en compte les multiples retours ou échos des données lidar (cf. ci-dessous 2.2 Traitements des données Lidar, des points aux fichiers raster).

Si le Lidar peut fournir de meilleures informations et en plus grand nombre sur le paysage que les données radar, telles que *Interferometric Synthetic Aperture Radar* (InSAR), il faut cependant noter que la technologie InSAR peut voler plus haut afin d'obtenir la collecte de données sur de plus grandes surfaces avec des temps d'acquisition plus courts. En outre, cette technique d'acquisition n'est pas affectée par la couverture nuageuse. Ainsi, des recherches sont actuellement menées pour déterminer le potentiel que pourrait offrir la combinaison des deux systèmes InSAR et lidar.

2.1.4 Etat de l'art en archéologie

Lidar, grâce à sa capacité de pénétrer la végétation, présente la seule possibilité d'observer directement sur de larges espaces les modifications de l'environnement naturel, dans le passé, et donc la détection des sites archéologiques. Il est ainsi possible de cartographier de manière très précise les structures archéologiques sous couvert végétal (vestiges d'habitat, remparts, tranchées, fosses, levées de terre...). La précision inégalée des données fournies par cette

technologie, rend également possible la détection de tous les micro-reliefs qui témoignent d'un aménagement ancien de l'espace, qu'il soit encore en activité ou non, tels que les planches de labour, les terrasses agricoles, les marques de division de l'espace (cadastres d'origine antiques par exemple), les canaux d'irrigation, les carrières ou zones d'extraction minière abandonnées, les tombes monumentales (tumulus), les anciennes voies de communication ou d'autres vestiges dont la détection n'est pas aisée ou très longue avec d'autres techniques telles que les relevés micro-topographiques, la prospection pédestre, aérienne ou la télédétection par exemple.

Malgré tous ces avantages, la technologie lidar n'a pourtant été introduite dans la recherche archéologique qu'assez récemment puisque les premières expériences remontent à la fin des années 90 avec des acquisitions financées par l'Agence de l'environnement du gouvernement britannique (Motkin 2001, Holden N. 2002). Ces premières expériences se sont surtout attachées à montrer le potentiel offert par la technologie laser en mettant en évidence des sites archéologiques (remparts, enclos, fossés). La recherche de sites inédits ou une cartographie précise de grands sites connus et emblématiques a ensuite fait l'objet de plusieurs expériences en Europe (Shell and Roughley 2004, Bewley 2003, Devereux et al. 2005, Doneus and Briese 2006). D'autres approches se sont également développées pour mettre en évidence d'anciennes structures agraires sous couvert forestier (Sittler 2004, Sittler and Schellberg 2006, Sittler et al. 2007). Enfin, plus récemment, des approches de type géomorphologique se développent pour mieux appréhender la paléo-hydrographie de vallées alluviales. Ainsi des projets tels que ceux de Witham valley, Val of York and Trent valley au Royaume Uni (Challis 2004, Challis 2006, Challis et al. 2006, Crutchley 2006) montrent non seulement le potentiel offert par les données altimétriques, mais aussi par les données d'intensité pour mettre en évidence des paléo-chenaux et le cours initial des rivières avant leur canalisation.

En France, les acquisitions Lidar destinées à des applications archéologiques sont extrêmement récentes et n'ont pas encore fait l'objet de publication puisque les données ont pour la plupart du temps été acquises entre fin 2006 et avril 2007. A ce jour nous pouvons recenser 9 projets⁵ sur le territoire national (Tableau 1). Cinq projets sont situés dans l'Est de la France en Bourgogne (DRAC Bourgogne et Centre Archéologique Européen Bibracte), en Lorraine (Drac Lorraine, INRA Nancy, ONF, Région Lorraine) et en Alsace (Pôle d'Archéologie Interdépartemental Rhénan). Les quatre autres projets dont le nôtre couvrent des terrains d'étude localisés en Auvergne (Association ARAFA), en Limousin, en Bretagne (DRAC Bretagne) et en Languedoc (CNRS – UMR 6565 / ZRC SAZU). Enfin, on signalera un projet mené par l'INRAP en forêt guyanaise pour le repérage de sites paléo-indiens (information : P. Depaepe, contact : Sylvie Jérémie, INRAP).

Pour l'essentiel, il s'agit de projets qui portent sur de grands sites archéologiques connus et leur environnement proche avec pour objectif la détection de nouveau sites ou de structures archéologiques associées. Ce sont en général des sites sous couvert forestier pour lesquels les techniques de prospection classique ne sont pas ou peu satisfaisantes tant en termes de résultats que de temps d'investigation. En Lorraine, il s'agit également d'une recherche sous couvert forestier mais plus extensive et dont l'objectif vise à détecter des structures parcellaires. Dans le domaine de l'archéologie du paysage, il semble que l'étude menée sur l'étang de Mauguio soit la première en France qui s'intéresse aux potentialités de la technologie Lidar pour une approche de type géomorphologique et paléo-topographique. Malgré une très large acquisition de données en 2002 (sur près de 1870 km², Delahaye et al. 2003) pilotée par la DIREN Centre, en Loire moyenne d'un part et les travaux géoarchéologiques d'envergures menés sur cette même zone d'autre part

⁵ Informations Murielle Leroy DRAC Lorraine.

(<http://www.msh.univ-nantes.fr/documentation/zal/>), nous n'avons trouvé aucune référence impliquant l'utilisation des données lidar pour la recherche archéologique.

Ainsi, bien que la technologie Lidar ait commencé à pénétrer la communauté archéologique française, nous avons déjà pris un certain retard par rapport à d'autres équipes européennes et le traitement et l'exploitation des données demeurent assez basiques. Il s'agit pour l'essentiel d'une reconnaissance visuelle de vestiges archéologiques ou parcellaire sur la base d'un modèle numérique de terrain réalisé et fourni par l'opérateur Lidar à partir des données altimétriques. Dans ce cas de figure, seule une partie des potentialités offertes par les données ont été employées tandis qu'une grande quantité d'informations contenues dans le nuage de points lidar n'est pas traitée. Dans le meilleur des cas, les modèles fournis seront adaptés à la problématique archéologique du moment, dans la pire des situations l'opérateur aura utilisé un algorithme classique sans se préoccuper du questionnement des archéologues et de nombreux vestiges seront alors invisibles alors qu'ils auraient pu être mis en évidence avec les données initiales. En effet, selon le type de filtrage et de classification des points utilisés pour réaliser le modèle numérique de terrain, on pourra plus ou moins mettre en évidence différents types de formes ou de structures. Les connaissances et le développement d'algorithmes de traitement ainsi que leur adaptation aux besoins particuliers offrent des possibilités d'innovations et la garantie d'une meilleure analyse des données. Il est donc important, quel que soient le projet et les capacités de l'équipe à traiter ces données de toujours obtenir les données brutes (Tableau 2) de la part de l'opérateur afin d'avoir la possibilité éventuelle de retraiter tout ou partie de ces données en fonction des problématiques de chacun.

De la même manière, on signalera que si l'intérêt des données altimétriques est parfaitement admis par les archéologues, les données d'intensité suscitent peu d'intérêt alors qu'elles offrent des potentialités intéressantes pour l'analyse de la qualité des sols, en particulier leur taux d'humidité, et par la même la détection de paléo-chenaux (Challis et al. 2006). Comme pour l'analyse d'image et la télédétection appliquées à l'archéologie, le champs des traitements et des analyses possibles est très vaste et, pour les données Lidar, il n'en est qu'à ses débuts y compris à l'échelle européenne.

Région	Organisme/Programme	Contact	Surface en km ²	Résolution points / m ²	Opérateur	Date	Milieu	Objectifs
Bourgogne (Mont Beuvray)	Bibracte	Vincent Guichard	20	12	Toposys	Avril 2007	Forestier	Oppidum et son environnement
Bourgogne (Saint-Martin-du-Mont)	DRAC Bourgogne, Université Lille, ENESAD	Patrice Beck, Jean-Louis Maigrot, Frank Faucher, Jean Marc Brayer	4	5	G2B	Décembre 2006	Forestier	Hameau médiéval déserté
Bourgogne (Mont Lassois)	PCR Vix et son environnement	Claude Mordant, Bruno Chaume				Début 2008	Forestier et ouvert	Oppidum et son environnement
Limousin (Tintignac)	Programme Leader +, UE	Vincent Guichard, Pierre Nouvel	20	12	Toposys	Avril 2007	Forestier	Sanctuaire et son environnement
Auvergne (Oppidum de cordes à Hérisson, Allier)	Association ARAFA	David Lallemand	4			2006	Forestier	Oppidum de Cordes
Lorraine (forêt de Haye)	DRAC Lorraine / INRA Nancy / ONF / Région Lorraine	Murielle Leroy	112	5.2 et 10 selon les secteurs	G2B	Mars 2007	Forestier	Cartographie des parcellaires gallo-romains, et étude de la végétation
Alsace (Oppidum du fossé des Pandours, Ste	Pôle d'Archéologie Interdépartementale Rhénan	Laure Koupaliantz	90	7	Guelle et Fuchs	Avril 2007	Forestier et ouvert	Sites archéologiques connus et leur environnement

marie aux Mines)	(PAIR)							
Alsace/Lorraine 2eme tranche de la LGV Est	RFF / DRAC Alsace / DRAC Lorraine / Pôle d'Archéologie Interdéparteme ntal Rhénan	Murielle Leroy, Laure Koupaliantz, Dominique Bonneterre	Plus de 250 km2	8	G2B	Janvi er 2008	Forestier et ouvert	Détection et documentation des sites archéologiques et des paysages anciens sur la totalité du deuxième tronçon de la LGV Est.
Bretagne (Paule- Côtes d'Armor)	DRAC Bretagne	Yves Menez (Inrap)Thierry Lohro (SRA)	10	5	G2B	Mars 2007	ouvert	oppidum
Languedoc (Plaine de Mauguio)	CNRS / ZRC SAZU – UMR 6565 / LEA ModelTER	Laure Nuninger Kristof Ostir	40	> 6	Heliogs	Déce mbre 2006	ouvert	Plaine littorale : paléotopographie, paléohydrographie, analyse du paysage dans la longue durée

Tableau 1 Inventaire des projets LiDAR appliqués à l'archéologie développés en France (d'après les informations de M. Leroy, L. Koupaliantz, V. Guichard, P. Nouvel, F. Faucher, L. Saligny, Y. Menez)

2.1.5 Du projet à la commande des données: ce que l'on découvre et ce qu'il faut savoir...

Selon les vestiges archéologiques que l'on souhaite mettre en évidence et selon le milieu biogéographique dans lequel ils se trouvent, le nombre de points acquis au m² a une grande importance. En effet, plus le nombre de point est élevé, plus la résolution finale est fine. En outre, si en terrain ouvert le nombre de points demandés est à 90% utilisable pour réaliser un modèle numérique de terrain, il faut bien imaginer qu'il n'en sera pas de même en milieu forestier où le dernier retour ou dernier écho (*last pulse*, cf. 2.1.2 - Les principes du LiDAR) ne touchera pas forcément le sol. Dans ce dernier cas, le nombre de points effectifs pour le dernier écho peut être divisé par deux voire plus, selon la densité du couvert forestier, et quatre après filtrage (Doneus and Briese 2006). Ainsi on peut passer initialement de 8 points au m² (premier retour ou écho – *first pulse*), à moins de 4 points au m² (dernier retour ou écho – *last pulse*) puis à 2,5 points au m² après filtrage pour la génération du Modèle Numérique de Terrain (DTM). Le nombre de points par m² qu'il faut demander dépend donc du type d'occupation du sol mais aussi de la dimension des structures que l'on souhaite mettre en évidence. En effet, on pourra réduire le nombre de points dans le cas de grandes substructures archéologiques, tandis qu'il faudra l'augmenter pour mettre en évidence des petites structures. Le nombre de points initiaux nécessaires est donc un paramètre fondamental à définir lors de tout projet d'acquisition. Bien évidemment, il peut être surestimé pour ne pas avoir de mauvaise surprise mais, dans ce cas, le budget sera largement surévalué car le nombre de point est directement lié au type d'appareil et au temps d'acquisition nécessaires. Dans certain cas, cette surestimation sera parfaitement inutile et ajoutera du temps de traitement supplémentaire pour filtrer les données. Il est donc nécessaire d'évaluer le nombre de points de la manière la plus optimale possible, en tenant compte des expériences déjà menées dans son champ d'application.

Directement lié à ce problème de résolution d'acquisition (nombre de points par m²), il est important d'étudier les offres des fournisseurs de données et notamment les spécifications techniques des appareils utilisés. En effet, l'acquisition comporte au moins 6 points par m² avec un système de Optech ALTM3033 tandis que les modèles plus anciens (ALTM2033 par exemple) utilisés dans le cadre des opérations de l'Environment Agency ne permettaient de collecter que 0.5 points par m² (Challis 2004).

Les principaux paramètres qui jouent sur la résolution finale des données sont la fréquence des impulsions du laser (de 10 à plus de 100 kHz), son angle de balayage (de 10 à 75°),

l'altitude de l'avion ou de l'hélicoptère et la vitesse enregistrée au sol. Plus la fréquence est élevée et l'angle, l'altitude et la vitesse faibles, plus les mesures obtenues seront précises. Dans le cas d'une application standard avec une fréquence d'impulsion à 33 kHz, soit 33000 observations laser par seconde, l'enregistrement des données de l'intensité, du premier et du dernier écho, à une altitude de 1000 mètres, permet d'obtenir une précision absolue en deçà de plus ou moins 15 cm (RMSE – erreur quadratique moyenne). Il faut noter que la précision relative est généralement beaucoup plus élevée. Le laboratoire « Unit for Landscape Modelling » de l'Université de Cambridge fournit un guide sous la forme d'une feuille de calcul Excel qui permet d'évaluer l'influence de chaque paramètre sur la résolution (<http://www.uflm.cam.ac.uk/lidar.htm>).

Comme pour le nombre de points par m², la définition optimale de ces paramètres dépend également du type d'environnement étudié et de l'objectif de l'acquisition. Ainsi, par exemple, pour la réalisation d'un DTM sous couvert forestier pour identifier des substructures archéologiques, il sera préférable de définir une fréquence élevée avec une altitude la plus faible possible mais un angle élevé (45°) pour avoir le maximum de chance de pénétrer la végétation. Dans ce cas de figure, on adoptera également un fort taux de chevauchement des zones scannées (50°), ce qui permettra à chaque objet d'être touché au moins deux fois, sur chacun de ses côtés (Doneus and Briese 2006).

Le meilleur moyen de bien définir les paramètres d'acquisition des données Lidar est de présenter le plus précisément possible son projet, notamment son objectif final et l'environnement étudié avec la précision finale attendue tant en planimétrie, qu'en altimétrie. Le fournisseur/opérateur de données Lidar est alors généralement en mesure de vous proposer la solution optimale et son coût. Toutefois, le nombre de fournisseurs fleurissant et la concurrence augmentant, il est prudent de maîtriser un minimum les principes de la technique et d'analyser correctement les spécifications techniques des offres avant de retenir celle d'un opérateur. L'offre la moins chère n'est pas toujours la plus mauvaise, ni la plus chère forcément la plus intéressante et la mieux adaptée. Dans tous les cas, lors d'un premier projet, l'expérience (non seulement la mienne, mais celle d'autres collègues) montre qu'une année est nécessaire pour mettre en œuvre un programme d'acquisition (de la définition du projet à la livraison des données).

En ce qui concerne notre projet sur la plaine de Mauguio, après des estimations obtenues en décembre 2005, une première invitation auprès de plusieurs fournisseurs de données, lancée au premier semestre 2006, a permis, en fonction de leurs questions, de mieux définir les spécifications techniques requises pour répondre à nos objectifs. Cette définition précise a permis de publier un avis de publicité détaillé dans le système PUMA, août 2006 (<http://www.sg.cnrs.fr/achats/marches-et-opportunites/pub/pub.htm>), conformément à la procédure d'achat du CNRS (cf. Annexe 1 et Annexe 2)

2.1.6 L'acquisition : préparation & mission

Pour respecter le budget attribué, nous avons-nous-même assuré la préparation de la mission qui consistait à faire l'acquisition de plusieurs points de contrôle repérables sur le terrain lors de la mission aéroportée. Huit points ont ainsi été enregistrés à l'aide de deux GPS lors d'une mission de quatre jours, à deux opérateurs, en novembre 2006 (cf. Annexe 3). Il faut noter que le temps est ici surestimé en raison de plusieurs défaillances techniques, dont celles des trois stations permanentes mises hors service en raison d'un orage.

L'opération d'acquisition a eu lieu le 21 décembre 2006 après avoir été repoussée trois semaines durant en raison des conditions climatiques qui ne permettaient pas le vol de l'hélicoptère depuis Trieste (Italie). Lors du vol, une station GPS au sol a été fournie par la

société Heliogs. Les enregistrements du GPS au sol ont été post-corrigés avec les données de la station de base de Montpellier (Réseau RGP - <http://rgp.ign.fr/STATIONS/fiche.php?type=station&ident=MTPL&lancer=Rechercher>), téléchargées par nos soins et transmises à l'opérateur qui s'est chargé de la post-correction. De manière globale l'opération a pris 2 jours pour un temps d'acquisition d'environ 2 h.

2.1.7 Les données

Les données Lidar ont été livrées en janvier 2007 et les données hyperspectrales en août 2007. Le premier jeu de données se présente sous la forme de 45 tuiles de 1 km sur 1 km environ. Chaque tuile est composée de deux fichiers, l'un correspondant au premier écho, l'autre au dernier écho. Dans les deux cas, il s'agit d'un simple fichier texte au format ASCII avec une ligne par point enregistré, décrit par un ensemble de 5 variables : [Identifiant] [Coordonnée X] [Coordonnée Y] [Coordonnée Z - altitude] [Intensité]. On notera que chaque fichier comporte plus de 2 500 000 points, ce qui représente plus de 120 millions de points pour l'ensemble de la zone étudiée pour le premier écho seulement. Le nombre de points enregistrés ne correspond pas au nombre d'impulsions, mais au nombre de retours ou d'échos (signaux réfléchis). Ainsi, dans le cas d'une zone de couvert forestier, une même impulsion pourra produire plusieurs réflexions (à partir du feuillage, des branches, du sol...), ce qui augmentera d'autant le nombre de points à enregistrer et à stocker et, bien sûr, la taille des fichiers résultats. En revanche, dans un paysage ouvert dénué de végétation, la même impulsion produira un seul point qui sera facilement identifiable comme un point au sol. En ce qui concerne notre projet, le poids des fichiers bruts représente à eux seuls, premier et dernier échos, près de 4 Go pour 40 km² soit environ 100 Mo par km² pour un paysage relativement ouvert.

```
383567.177200 733773.250 3146574.860 6.200 28.0
383567.205400 733770.820 3146580.230 6.360 13.2
383567.205400 733771.070 3146579.860 6.430 10.6
383567.208200 733771.190 3146579.710 6.280 12.7
383567.237200 733768.460 3146585.650 6.240 18.0
383567.266000 733766.270 3146590.780 6.350 16.5
383567.266200 733766.010 3146591.190 6.410 14.4
383567.266200 733765.770 3146591.560 6.320 18.0
383567.295000 733763.190 3146597.320 6.420 18.0
383567.324000 733760.750 3146602.900 6.510 22.0
383567.348200 733758.830 3146607.230 6.580 16.0
383567.353000 733758.540 3146608.140 6.550 24.0
383567.353000 733758.040 3146608.920 6.570 22.0
383567.376600 733756.210 3146613.000 6.600 16.0
.....
```

Tableau 2 – Exemple de fichier de données Lidar brutes (fichier au format ascii)

Importé dans un logiciel de traitement de données Lidar tel que LASEdit de Cloud Peak Software (<http://www.cloudpeaksoftware.com>), ce fichier peut ensuite être visualisé sous la forme d'un nuage de points (Figure 4 et Figure 5) pour être ensuite filtré et traité afin d'obtenir un modèle numérique de surface (DSM) ou de terrain (DTM) (cf. 2.2 Traitements des données Lidar, des points aux fichiers raster). On remarquera d'emblée la résolution élevée des données avec des points qui permettent de redessiner la forme des arbres et la ligne électrique (Figure 5)

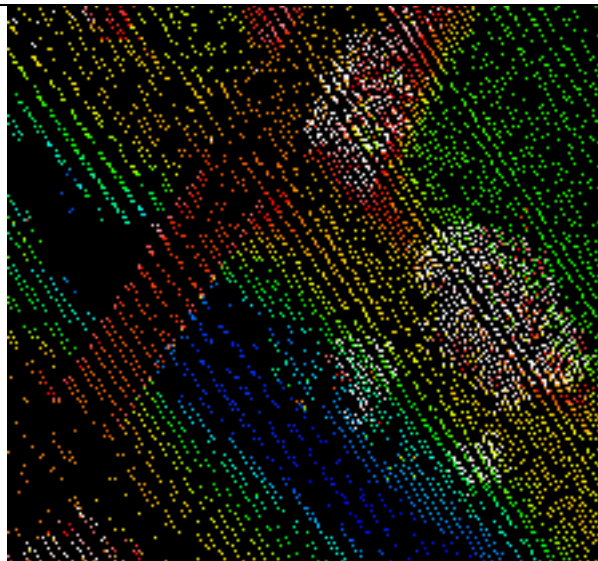


Figure 4 – Visualisation du nuage de points selon les valeurs d'altitude

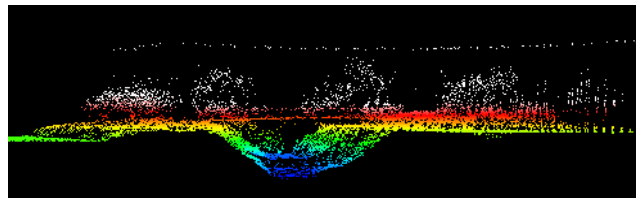


Figure 5 - Visualisation du nuage de points en profil selon les valeurs d'altitude

Le jeu de données hyperspectrales est encore plus lourd à manipuler puisqu'il représente à lui tout seul près de 130 Go de données, divisé en 10 bandes géographiques composées chacune de 3 groupes de fichiers de 4 Go chacun en moyenne, pour une résolution de 0.5 m. L'imagerie hyperspectrale consiste en une acquisition simultanée d'images en de nombreuses bandes spectrales étroites et contiguës. Ces images sont collectées par un capteur spécifique qui en général opère dans les domaines visible et infrarouge du spectre. Chaque pixel de la scène observée possède une signature spectrale similaire à celles des minéraux obtenus en laboratoire. Ainsi, les données hyperspectrales offrent une information plus détaillée d'une scène que d'autres types de données de télédétection acquises en bandes plus larges et non contiguës (http://ccrs.nrcan.gc.ca/hyperview_f.php). Ces images de synthèse présentent de nombreux avantages, mais le plus important correspond à la capacité d'identifier les matériaux qui composent un objet. Cela se fait par l'analyse des signatures spectrales des différents éléments. Pour l'instant, ces données ont simplement pu être visualisées, leur traitement va débuter au début de l'année 2008 dans le cadre de deux zones tests de respectivement 1,2 et 1.5 km² (cf. 2.3.2 - Analyses spatiales en développement et cas d'études)

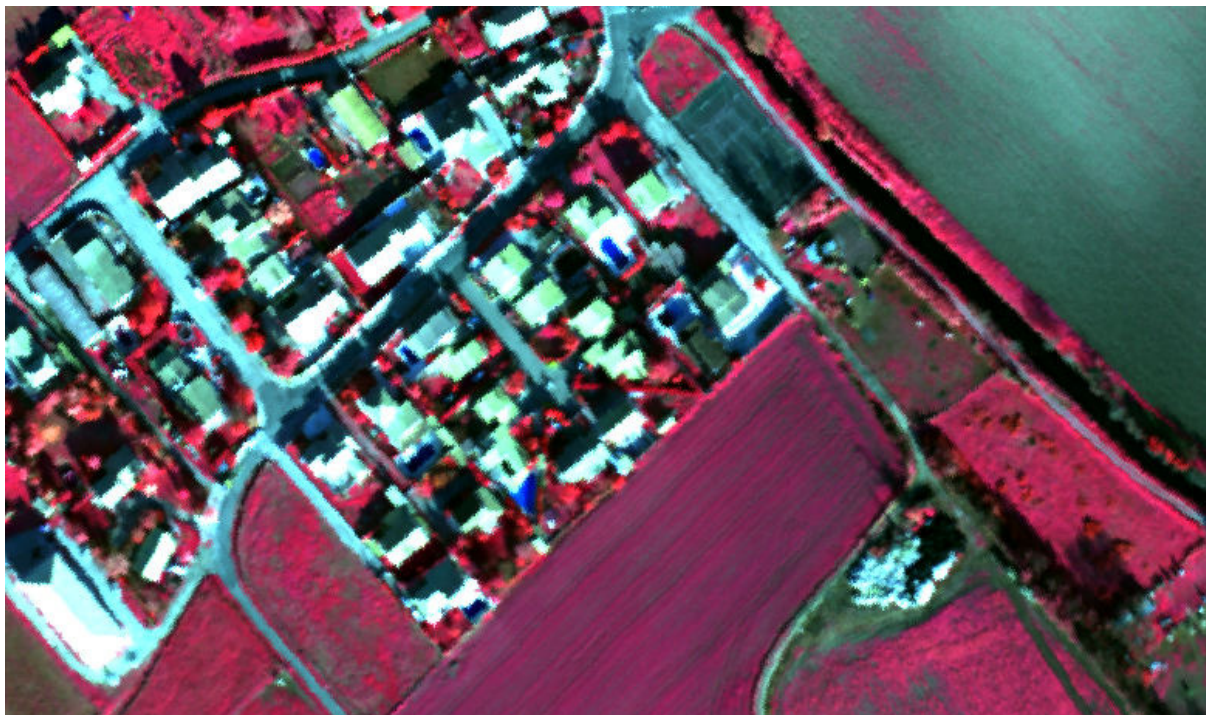


Figure 6 – Images hyperspectrales en couleur RGB, bande 22, 16 et 9

2.2 Traitements des données Lidar, des points aux fichiers raster

Il est assez simple de produire un modèle numérique de surface (MNS) à partir des données lidar avec une simple interpolation des données brutes. Le MNS représente la surface visible depuis la plate-forme aéroportée. Il s'agit du terrain mais aussi de tous les objets qui modèlent la surface tels que les bâtiments, les infrastructures mais aussi la végétation. Si ce modèle est fort utile pour certaines applications géographiques, par exemple, ce qui intéresse plus l'archéologue c'est généralement le modèle numérique de terrain (MNT). Pour produire ce MNT, seuls les points représentant le sol doivent être utilisés pour l'interpolation. Cela signifie donc que le nuage de points doit être automatiquement classé en fonction de propriétés géométriques et des valeurs des points. Cette opération dite de filtrage est probablement l'étape la plus importante puisqu'elle va réduire l'information qui sera ensuite interpolée et analysée à partir du modèle numérique produit. Si l'information est trop réduite, certaines structures recherchées risquent de ne pas apparaître dans le modèle alors qu'elles existent en réalité. Si l'information n'est pas assez réduite ou mal classée, alors le modèle final sera chargé de bruits rendant impossible toute lecture des structures ou sera marqué par des artefacts de classification révélant des reliefs erronés (par exemple un micro-relief qui ne serait autre qu'un buisson). Le filtrage est donc une opération délicate qui requiert toute notre attention pour obtenir des résultats satisfaisants. Quand cette étape est terminée, les points extraits comme étant des points de sol sont ensuite interpolés pour obtenir une surface, le MNT, sous la forme d'un maillage de pixel (raster) où chaque pixel carré prendra la valeur moyenne des points qui constituent les quatre sommets du pixel. C'est à partir de ce MNT qu'un certain nombre d'analyses pourront ensuite être effectuées tels que des calculs de pente, d'ombrage, d'ensoleillement et de contours par exemple.

L'ensemble du processus de l'acquisition des points à la production du MNT est presque linéaire comme le montre le diagramme décrivant chaque étape de transformation des

données. Nous reviendrons en détail sur la procédure et les outils utilisés par notre équipe ci-dessous (Figure 7).

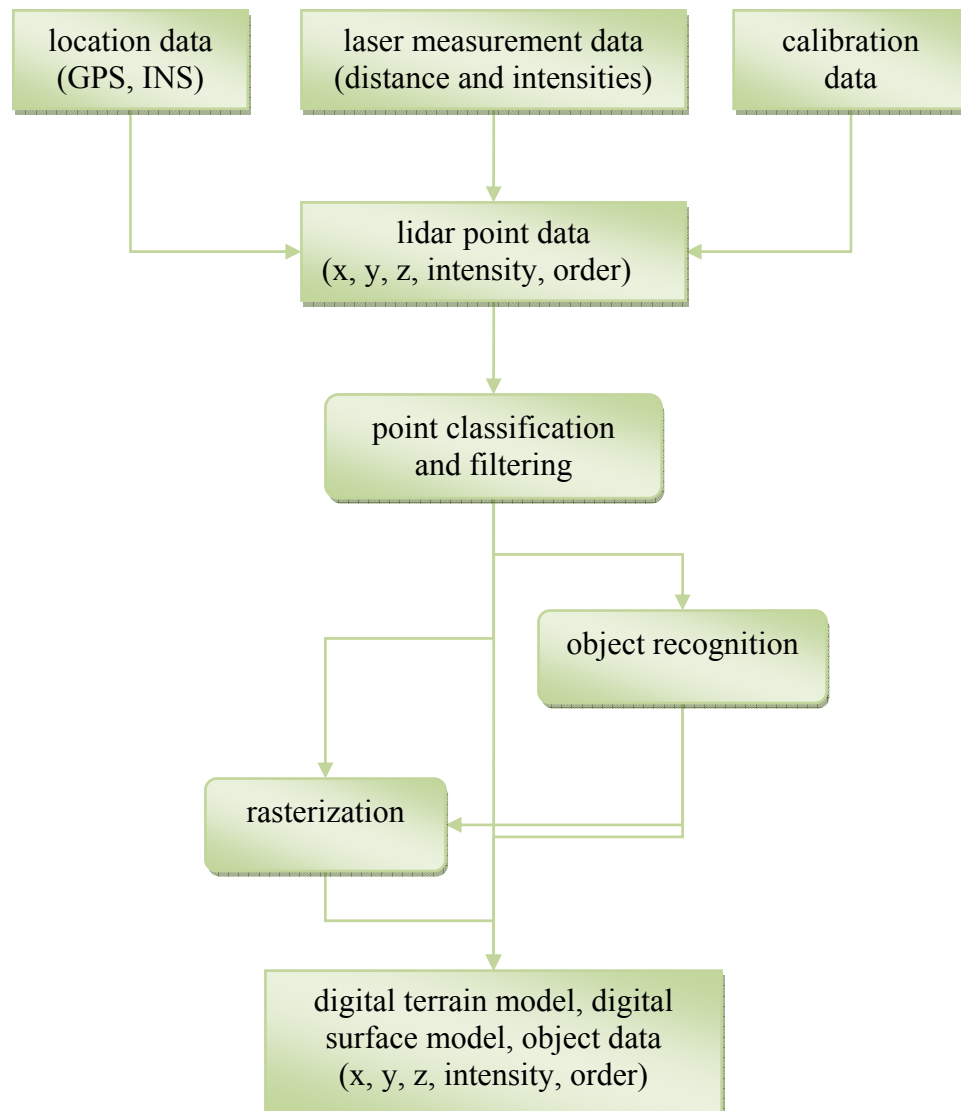


Figure 7 - Traitement du nuage de points lidar.

La gestion, la programmation et les traitements des données lidar ont été réalisés avec les logiciels ENVI (<http://www.itvvis.com/envi/>) et IDL (<http://www.itvvis.com/idl/index.asp?l=french>). Le filtrage du nuage de points et la conversion des fichiers ont quant à eux été réalisés avec le logiciel LASEdit (<http://www.cloudpeaksoftware.com>).

2.2.1 LASEdit

LASEdit est un logiciel professionnel d'édition des données Lidar. Il est conçu pour fonctionner avec des données lidar sous la forme d'un nuage de points au format d'échange standard (LAS). LAS est un format de fichier relativement compact avec un encodage binaire de points de localisation et des attributs de ces points. L'actuelle version 1.1 du format LAS est largement admise dans l'industrie et implanté dans la plupart des logiciels de post-traitement, d'édition et de classification de données Lidar.

LASEdit est capable d'automatiser l'extraction de données pour la production d'un modèle de terrain, de visualiser les données, d'opérer des traitements par lots et de réduire les données, ce qui correspond aux traitements de données lidar les plus utilisés. Le logiciel comporte également un algorithme appelé « Surface Magic » qui permet d'extraire de manière automatique les points reconnus comme étant des points au sol (ou de « terrain nu / *bare earth* », c'est-à-dire sans végétation). Les points sont classés en deux catégories nommées « terrain nu » et « objets extraits ». La classe « terrain nu » représente tous les points enregistrés au sol, tandis que le reste des points, les « objets extraits », correspondent à de la végétation, des bâtiments ou d'autres objets anthropiques). Bien que la procédure soit automatisée, elle peut être contrôlée par deux paramètres : le relief à prendre en compte « *Terrain Biais* » et l'aspect souhaité « *Aesthetic* ». Dans le premier cas, il est possible de spécifier la rugosité du terrain, soit de tenir compte de la morphologie dominante du terrain, plane à accidentée, afin d'éviter qu'un pic ou une falaise ne soit reclassé en « autres objets ». Le second paramètre permet de préciser le degré de lissage à appliquer. On appliquera un faible degré de lissage afin de conserver le plus grand nombre d'écarts mineurs (indépendamment de leur inclinaison), ce qui permettra de conserver des détails comme les labours, les petits dispositifs de drainage... Au contraire, on appliquera un fort degré de lissage pour généraliser localement la courbe de tendance et diminuer le bruit dû aux écarts mineurs afin de ne conserver que les structures les plus importantes.

En réalité, ce type d'algorithme classe les points en fonction de la distance qui les séparent et leurs écarts de valeurs. Ainsi, un changement de valeur très rapide distinguera les points de sols des autres éléments, tandis que des points proches aux valeurs continues seront considérés soit comme des points de sols, soit comme des points d'autres éléments en fonction de leur voisinage.

Bien que LASEdit offre une procédure de classification automatisée, il est possible d'intervenir manuellement pour reclasser les points avec des polygones ou en sélectionnant individuellement les points. Il est également possible de charger des images géoréférencées ou des données vectorielles en arrière-plan afin de guider la procédure manuelle.

Les données brutes et reclassées peuvent être visualisées avec les nombreux outils offerts par LASEdit en profil, en 2D ou 3D (Figure 4, Figure 5, Figure 8). Bien que les points soient automatiquement affichés avec des couleurs selon leur valeur altimétrique, l'affichage peut être modifié et adapté selon le besoin des utilisateurs avec des options d'ombrages et de contours par exemple (Figure 8).

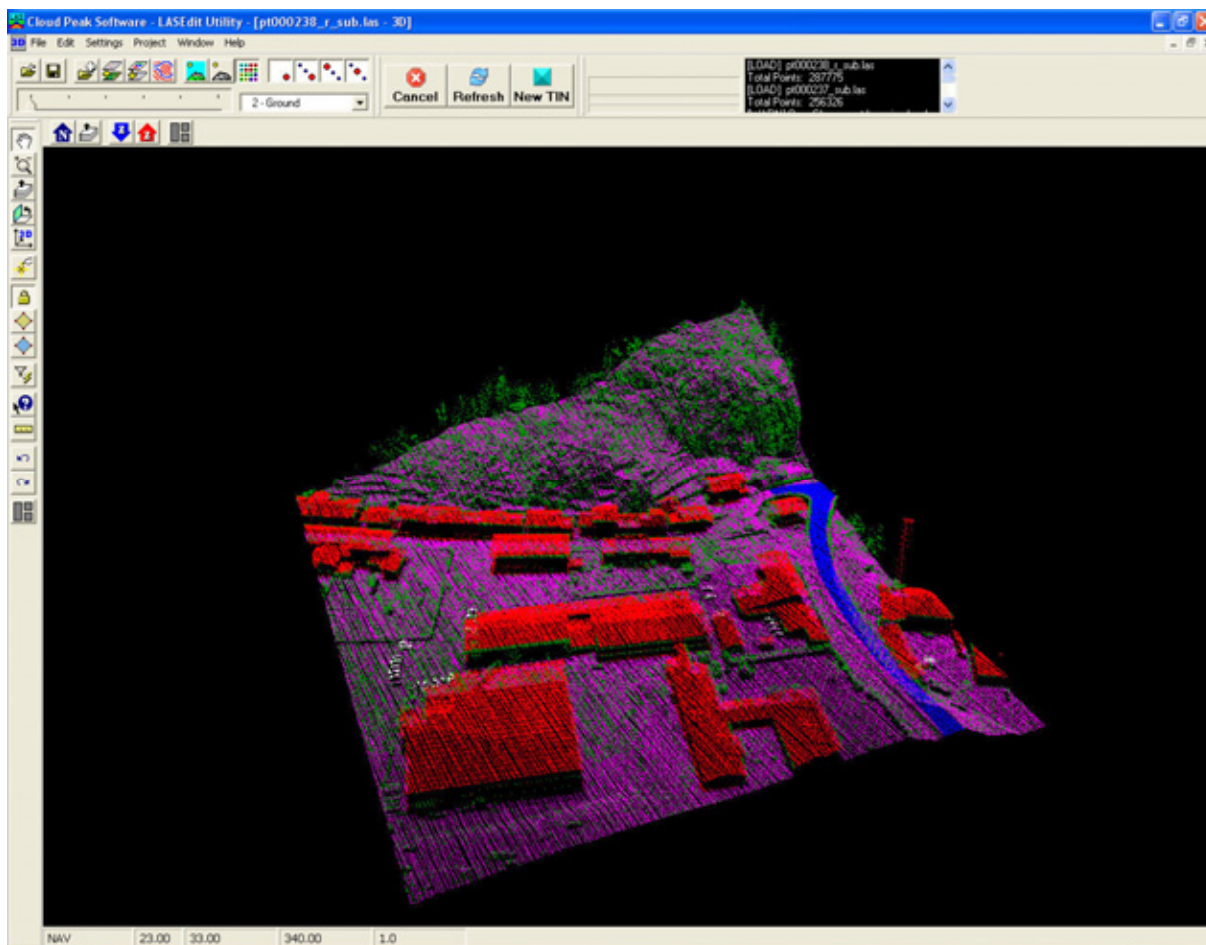


Figure 8 - LASEdit 3D view displaying classified point

2.2.2 Traitements des données et résultats

Dans cette partie on s'intéressera aux traitements opérés sur le nuage de points qui constitue la principale base de données pour produire une image de relief. Aux différents stades du traitement, les logiciels LASEdit, ENVI et IDL ont été utilisés afin de produire un modèle numérique de terrain ainsi qu'une image d'intensité des points au sol pour l'ensemble de la zone étudiée.

Comme nous l'avons annoncé ci-dessus (2.1.7 Les données), les données lidar ont été livrées sous la forme de 45 tuiles comprenant deux fichiers : les points de sol et les points d'objets. Le fournisseur de données a en effet opéré un premier filtrage et une classification des données avec son propre logiciel de traitement et ses propres paramètres sans que l'on sache exactement lesquels. Un premier modèle numérique de terrain avec une résolution de 1m a été produit à partir de cette classification. Toutefois, après une analyse précise des données et plusieurs essais, les résultats n'étant pas satisfaisants, nous avons estimé que le filtrage devait être refait avec des paramètres adaptés pour créer le modèle numérique de terrain dont nous avons besoin.

A cette fin les données de deux fichiers ASCII (sol et objet) ont été fusionnées en un seul fichier à l'aide des capacités de programmation IDL. Les fichiers résultant du calcul sur l'ensemble des 45 tuiles ont ensuite été convertis du format ASCII au format LAS, ce qui a permis de réduire d'environ 40% l'espace disque utilisé par les données d'origine. Le filtrage a ensuite été réalisé avec le logiciel LASEdit en définissant les paramètres de telle manière

que l'on puisse conserver un haut niveau de détail (faibles micro-reliefs) dans une zone extrêmement plane.

Si le logiciel LASEdit est capable de créer des contours ou de générer un TIN à partir des points classés pour la visualisation, il n'est pas en mesure de les enregistrer et de les exporter. De la même manière, il ne peut pas dissocier les points classés et les enregistrer dans des fichiers séparés. Pour cette raison, l'ensemble des fichiers de points filtrés a d'abord été exporté du format LAS au format ASCII. Les nouveaux fichiers produits contiennent un attribut supplémentaire par rapport aux données brutes - le numéro de la classe de chaque point – qui est ensuite utilisé par un algorithme de tri programmé sous IDL pour extraire un fichier de points sol. Ce fichier a ensuite été importé dans le logiciel ENVI pour procéder à la rasterisation des points (passage d'un point à un maillage raster) avec la commande *Rasterize Point Data*. L'ensemble des 45 fichiers raster produits ont ensuite été associés dans un seul avec une procédure de type mosaïque pour produire le modèle numérique de terrain (MNT) qui couvre l'ensemble de la zone étudiée. Le MNT final obtenu a une résolution de 50 cm et est géoréférencé dans le système de coordonnées Lambert zone III.

Il s'agit d'un premier MNT qui permet de procéder à la détection et à l'interprétation visuelle des anomalies recherchées (micro-reliefs ou dépressions par exemple). C'est également un outil de base pour développer différents protocoles d'analyses (analyse de contours, extraction de structures récentes, filtrage directionnel, ombrages...) sur des zones tests avec toutefois la possibilité d'un retour sur les données brutes pour produire un nouveau MNT sur ces zones, avec des paramètres de classifications affinés et complétés par une classification manuelle dans les cas problématiques.

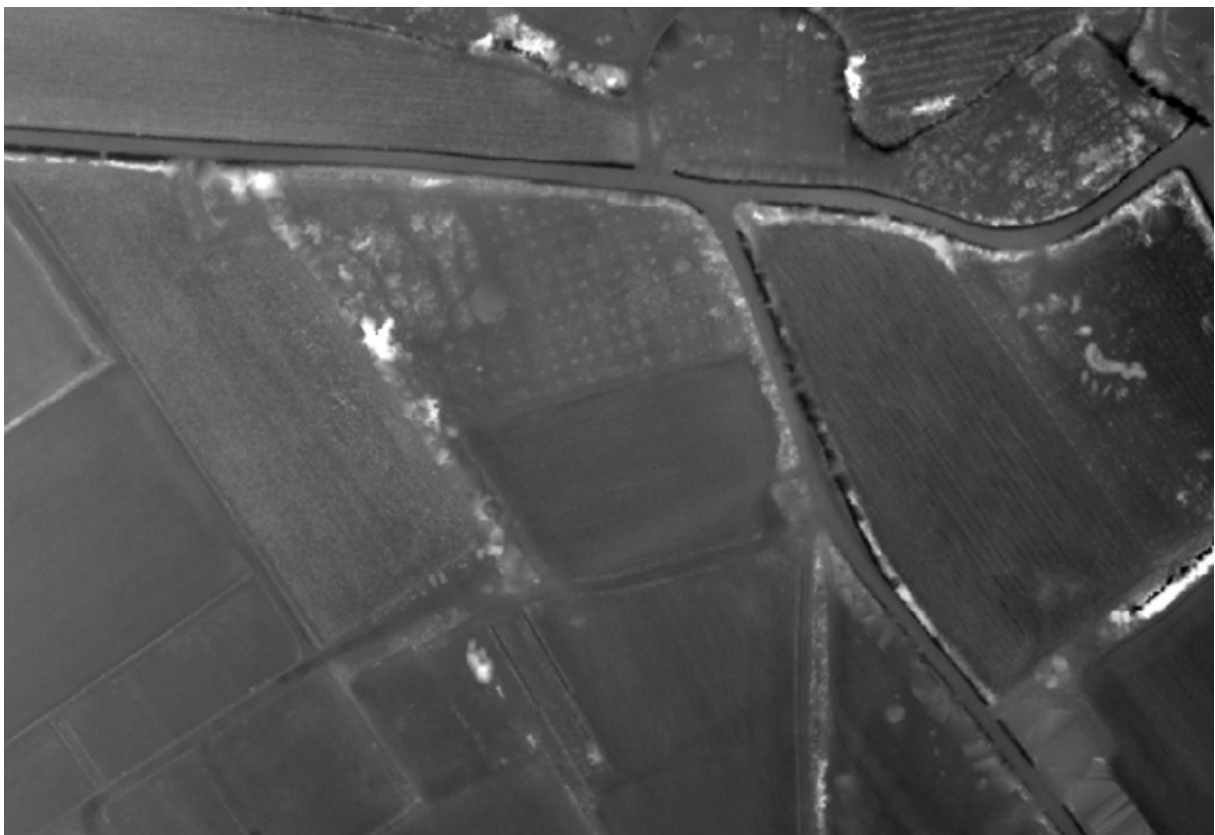


Figure 9 – MNT Lidar avec une résolution de 0.5 m

En plus du MNT, l'image d'intensité a également été créée à partir du même filtrage de points. Cette image représente les valeurs de réflectance enregistrées par les points au sol. Les valeurs de réflectance exprimée, en pourcentage, diffèrent selon le type de surface touchée. La neige par exemple pourra refléter 90% de l'intensité du signal tandis que l'asphalte noir réfléchira seulement 5% de l'énergie émise. Le fichier raster d'une résolution de 50 cm généré à partir de ces données peut être considéré comme une image classique (Figure 10).



Figure 10 – Image d'intensité des points Lidar au sol avec une résolution de 0.5 m (les zones interpolées où les bâtiments ont été supprimés sont clairement visibles – en bas à droite)

Du fait de la masse considérable des données, le traitement seul de l'ensemble des points bruts à la production d'un modèle numérique de terrain et de l'image d'intensité a pris plus de trois semaines de travail à temps plein. La durée du traitement est pour partie attribuable à l'utilisation de différents logiciels qui nécessitent plusieurs conversions de fichiers en passant par le format ASCII. Le développement d'algorithmes pour la gestion des données avec IDL a également été consommateur en temps. Il est certain que l'utilisation d'un logiciel intégré comportant les différents modules développés par notre groupe ou achetés permettrait d'accélérer le processus de manière considérable, mais cela nécessite plus de temps et de ressources.

2.3 Analyses et interprétations archéologiques

Les premières analyses et interprétations archéologiques dont ne nous ne présenterons qu'un aperçu, car elles sont en cours, s'appuient sur le MNT et l'image d'intensité finals produits par notre équipe avec une résolution de 50 cm. Ces données ont été combinées à d'autres informations, notamment des ortho-photos provenant de plusieurs missions IGN et militaires (clichés des alliés de 1944) que nous avons pour partie scannées et géoréférencées pour les intégrer au SIG développé depuis 2004 sur la plaine littorale de Mauguio. De la même manière, les mappes cadastrales à 1/5000 de la Compagnie Nationale d'Aménagement Régional du Bas Rhône Languedocien (CNARBRL) disponibles pour la zone étudiée ont été scannées et géoréférencées afin d'être croisées avec les autres données et vectorisées en partie. On signalera également qu'est intégré au SIG la couverture à 1/25000 scannée (scan25 de l'IGN) ainsi qu'un MNT d'une résolution de 25m produit antérieurement par l'équipe et toutes les informations dérivées par la détection et l'analyse des indices de paléoreliefs (Nuninger and Ostir 2005, Ostir and Nuninger 2006, Coulon 2006). Enfin, les données archéologiques intégrées proviennent de la base de sites archéologiques Archaeomedes II révisée en 2004.

2.3.1 Reconnaissance et photo-interprétation

Afin de développer un protocole d'analyse spatiale adéquat, une première étape assez longue de la recherche consiste dans l'analyse exploratoire des données. Cette étape vise à identifier les informations qui peuvent être extraites du MNT lidar et cerner la meilleure manière de les détecter en travaillant sur l'affichage ou le filtrage de l'image. Nous avons en partie conduit cette analyse exploratoire à l'aide d'informations préalablement extraites d'autres sources de données planimétriques (cadastre napoléonien, images satellites et aériennes) dans le cadre de travaux menés par François Favory et Gérard Chouquer.

Nous présenterons quelques cas illustrés pour montrer le potentiel que peuvent apporter les données Lidar, puis nous nous concentrerons sur les premiers développements et les résultats obtenus dans trois zones d'études sélectionnées pour poursuivre les analyses.

♦ Observations sous couvert végétal

La plaine littorale de Mauguio présente un paysage quasi totalement ouvert. Seules quelques zones se situent sous couvert boisé. Comme nous l'avons expliqué ci-dessus, un des avantages de la technologie lidar est de pouvoir pénétrer la couverture végétale afin de renvoyer un signal correspond au sol nu. Ainsi, comme l'illustrent les figures ci-dessous (Figure 11 et Figure 12), il est possible de détecter le parcellaire en sous bois. Afin de valider ces observations, nous avons croisé les données obtenues par le MNT lidar avec les relevés de la CNARBRL datant des années 60 et mises à jour en 1986 (Figure 11 c). On remarque d'emblée la parfaite adéquation entre les deux documents ce qui nous permet de valider l'algorithme de filtrage utilisé. La comparaison des deux figures (Figure 11 et la Figure 12) souligne également les difficultés rencontrées lors du filtrage des données brutes. En effet, les limites parcellaires représentées dans la première figure apparaissent beaucoup moins clairement que dans le second cas. Il reste beaucoup de bruits avec une texture de l'image qui apparaît très granuleuse (Figure 11 b et c). Ce résultat est dû à un couvert végétal

probablement récent avec une part très importante de végétation arbustive assez rase. Dans ce cas et compte tenu du relief extrêmement faible de la lagune, il est très difficile de distinguer les points au sol des points décrivant la végétation basse. Si nous devons travailler de manière plus détaillée sur cette zone, il serait nécessaire de procéder à un nouveau filtrage à partir d'informations complémentaires qui permettrait de mieux modéliser la végétation à prendre en compte.

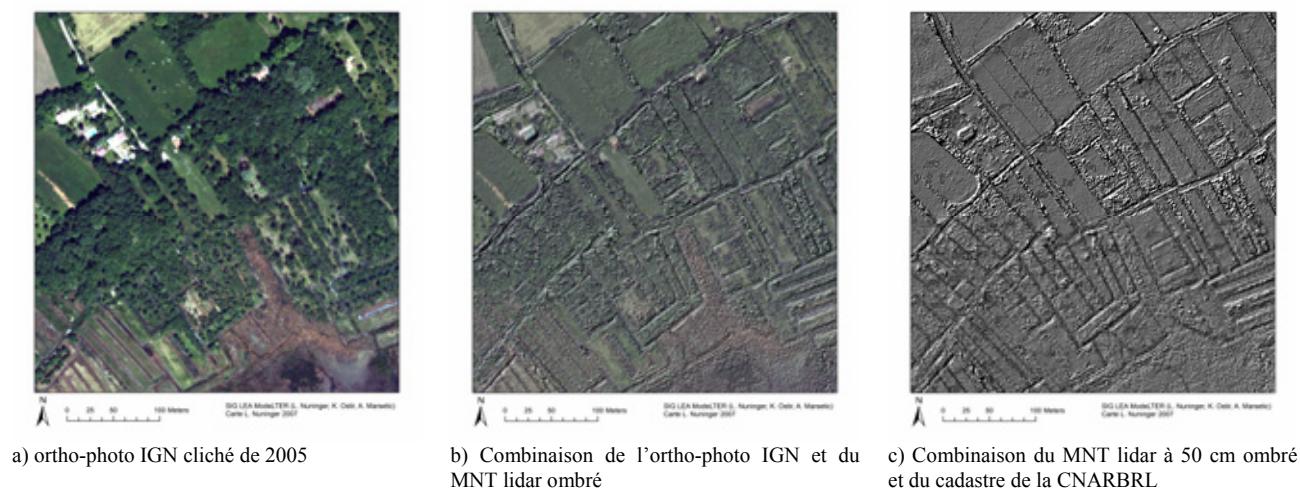


Figure 11 – observation du parcellaire sous couvert forestier au lieu dit Bosc Viel au sud de la commune de Mauguio, à l'est de la pointe du Salaison

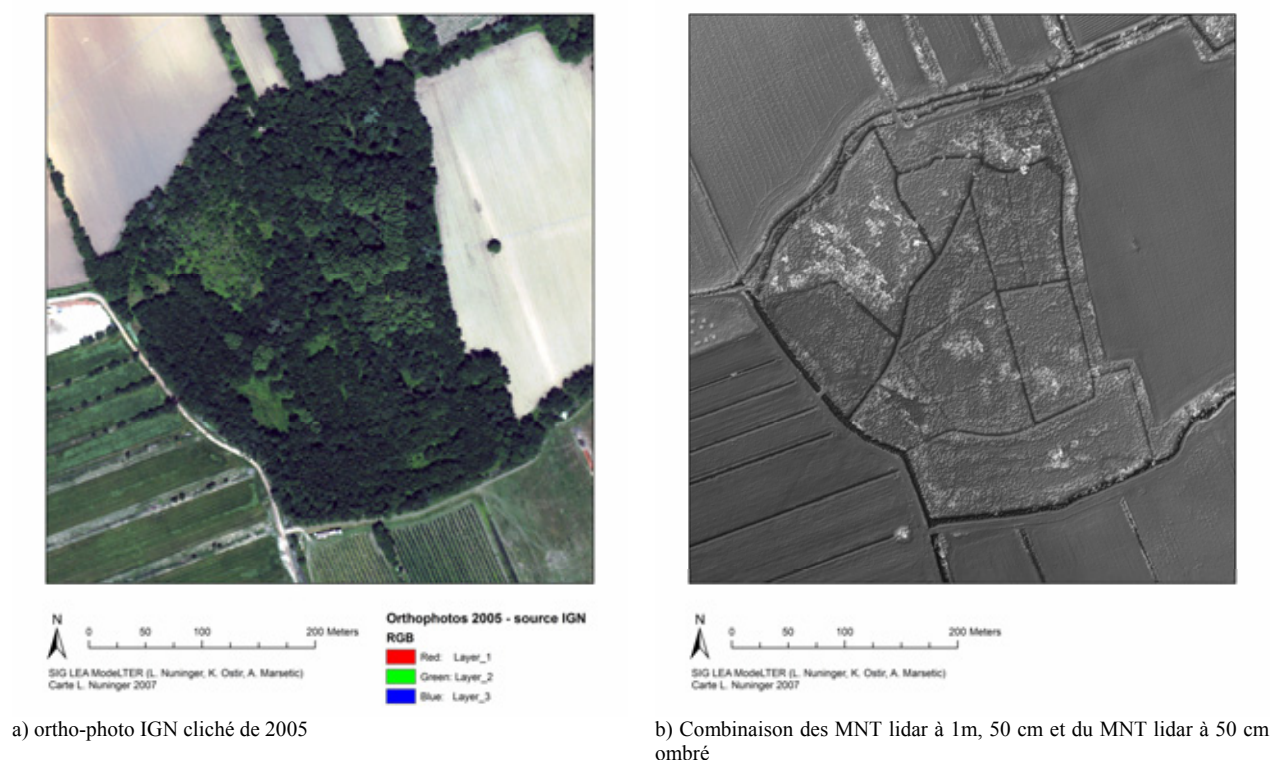


Figure 12 – observations sous couvert forestier d'une anomalie parcellaire située au sud-est de Mas Desport (Marsillargues)

Dans le cas du petit massif forestier situé au sud-ouest de la commune de Marsillargues (Figure 12), le bois plus ancien puisqu'il est déjà relevé comme tel sur la mappe cadastrale de

la CNARBRL a favorisé l'obtention de meilleurs résultats avec les mêmes paramètres de filtrage. Dans le cas de cette anomalie parcellaire inédite, on notera la précision de la détection des limites parcellaires dont seulement une partie avait pu être relevé par la CNARBRL (Figure 13a).

Cette anomalie déjà présente sur le cadastre napoléonien (Figure 13b) est bordée au sud par le ruisseau de la Capouillère qui est un cours d'eau canalisé depuis le site du Mas Saint Julien situé au nord-est sur la même commune. La construction de ce canal remonte très probablement au Moyen Âge comme le souligne J.-M. Malvis d'après un texte de la fin du XIème siècle dans lequel il est précisé qu'à l'occasion d'une convention passée entre le seigneur de Lunel et l'abbé de Psalmodi, un canal aurait été créé à partir d'un cours d'eau appelé « Caupaleriam » (Malvis 1988). Compte tenu de la localisation de cette anomalie à moins de 300 m à l'est de l'emplacement supposé de l'église détruite de Notre Dame Desport mentionnée par la carte de Cassini et d'une série de tombes découvertes en prospection, nous envisageons de reprendre l'ensemble des données sur le secteur compris entre le Mas St Julien (est du village de Marsillargues) au nord, le ruisseau de la Capouillère à l'est, le chemin du Mas Desport à St Julien à l'ouest et l'anomalie repérée au sud. Très bien documenté tant par les textes que la prospection, il s'agit d'un secteur clef pour appréhender les aménagements de la plaine durant l'antiquité et la période médiévale, notamment pour bénéficier de l'accès à l'Etang via le port antique du Mas Desport.



a) Extrait du Cadastre de la CNARBRL annoté par F. Favory et C. Raynaud (En bleu : cours d'eau et fossés ; en vert : zone d'épandage agricole antique et/ou médiévale ; en rouge : site archéologique – nécropole et habitat).



b) Extrait du cadastre napoléonien (l'anomalie parcellaire est mise en évidence par la zone grisée bordant un ancien marais – annotation de F. Favory)

Figure 13 – Relevé CNARBRL et cadastre napoléonien de l'anomalie parcellaire du Mas Desport

Actuellement les filtres développés et testés par l'équipe du LEA ModelTER (<http://modelter.zrc-sazu.si/>) sont performants pour les zones sous couvert forestier, mais beaucoup moins en contexte végétal ras et couvrant. D'un point de vue méthodologique, c'est un des aspects qui fera l'objet d'un développement spécifique par l'équipe.

◆ Observations de chemins ou de limites parcellaires disparues

En contexte ouvert, le relevé micro topographique fourni par les données Lidar permet de mettre en évidence des micro-reliefs d'origine anthropique qui ont disparu du paysage actuel lors de phases de réaménagement. C'est le cas par exemple pour d'anciennes voies désaffectées dont on peut observer une trace en partie visible sur la photographie aérienne verticale de 2005, confirmée par le tracé existant sur les relevés de la CNARBRL datant des années 60 (Figure 14, à droite et à gauche). Sur le MNT produit à partir des données Lidar et visualisé avec un effet d'ombrage, il est bien sûr possible d'identifier sous la forme d'un léger relief, le tracé relevé sur les deux documents précédents, mais également son prolongement au nord invisible sur les autres documents. Ce prolongement est clairement repérable sur le cadastre Napoléonien où il constitue un segment d'une voie dite « Chemin de St Martin à la Métairie du Bouet ». Cette voie sans rapport avec le cadastre antique, dessert trois sites médiévaux occupés entre le Vème et le XIIIème siècle. Au niveau du site de la Font Rulle (X-XIème s.), situé au nord sur la commune de Mudaison, ce chemin rejoint un itinéraire d'origine probablement antique et permet la connexion directe de sites médiévaux importants : Saint Martin Caveirac (V-XIIIème s., Mauguio) et Saint André de Moulines (Ier-XIIIème s., Lansargues). Compte tenu de cette connexion à Font Rulle, F. Favory suggère une datation de la voie comprise entre Xème et le XIème siècle (Favory, Raynaud et al. 1993)

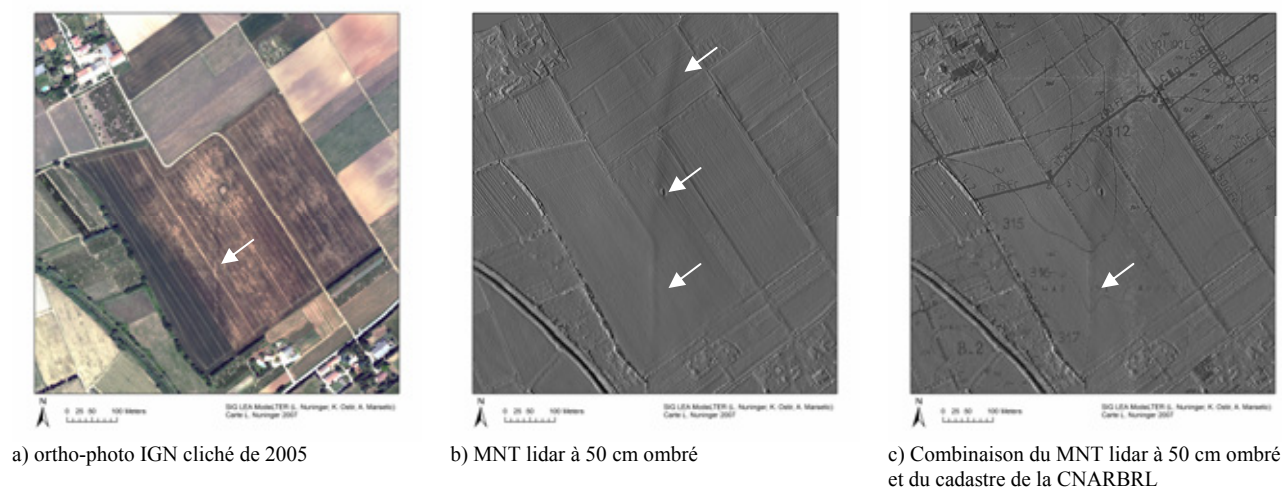


Figure 14 – Détection d'un ancien chemin au sud-est du Mas de Bouet (Mauguio)

Pour mesurer le potentiel offert par le traitement des données Lidar, il faut souligner le caractère extrêmement plan de la zone étudiée et le très faible dénivelé de l'ordre d'une quinzaine de centimètres qui permet de mettre en évidence l'ancien chemin (Figure 15). Le micro-relief présente une largeur d'un peu moins de 25 m mais c'est sa continuité nord-sud qui permet de le repérer.

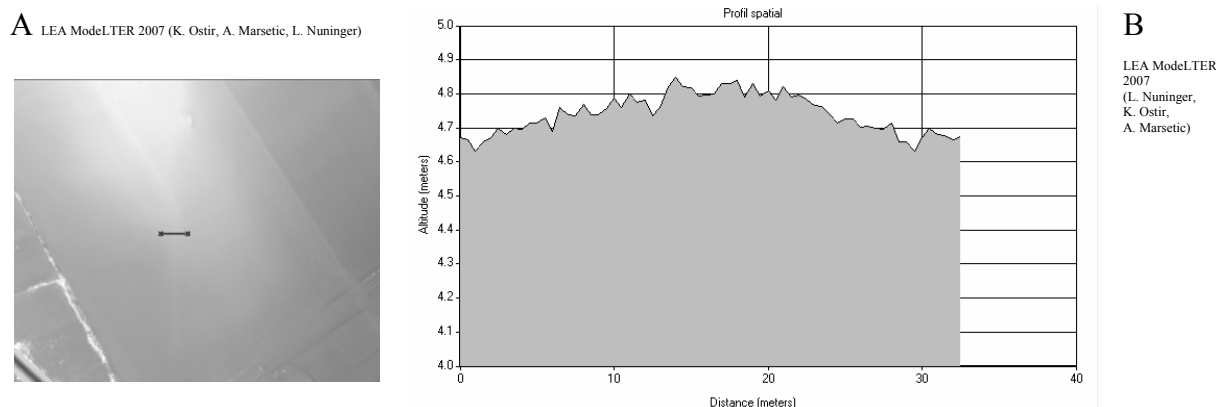


Figure 15 – Profil topographique de l'ancien chemin situé au sud-est du Mas Bouet (Mauguio) : A) Localisation du profil sur le MNT Lidar à 50 cm ; B) Profil topographique.

Avec cet exemple, nous attirons l'attention également sur le problème de la sensibilité au bruit que ce type de données enregistre. Le profil topographique réalisé sur le chemin montre les écarts de 5 à 10 cm parfois enregistrés sur des points très proches. Ce phénomène est lié à la précision du relevé (2.1.2 - Les principes du LiDAR), d'une part, et à l'algorithme de filtrage, d'autre part. En effet, si on souhaite mettre en évidence des micro-reliefs sur des espaces extrêmement réduits, par exemple des sillons de labour, le filtre sera paramétré pour détecter des changements d'altitude très rapides entre deux points très proches. Dans ces conditions, dans les zones planes mais couvertes par de la végétation rase, le filtre risque de prendre en compte, pour décrire la surface au sol, des points qui sont en fait des retours de végétation et créer ainsi des micro-reliefs inexistant dans le modèle produit que l'on pourra associer à du bruit. A l'inverse, si le filtre est paramétré avec un lissage plus important, certains objets recherchés peuvent disparaître alors qu'ils existent. Cette remarque montre qu'un MNT produit n'est qu'un modèle parmi d'autres et que l'interprétation des données Lidar par l'archéologue doit se faire pas à pas d'abord sur des objets connus - ou vérifiés à posteriori sur le terrain - pour bien identifier les limites des données acquises et du filtre utilisé. Cette démarche permet de cerner les caractéristiques des différents types d'objets recherchés de manière à préciser ensuite le paramétrage de l'algorithme de filtrage pour produire chaque modèle adapté aux objets et contextes. Ainsi, dans le cas d'une acquisition liée à la production d'un MNT par le fournisseur de données Lidar, il est extrêmement important d'exiger la fourniture des données brutes de manière à pouvoir les retraiter selon les problématiques abordées et les objets recherchés.

Dans une zone actuellement délaissée par l'agriculture, mêlant friche et prairie, le MNT Lidar ombré permet de mettre en évidence plusieurs limites parcellaires devenues inactives (Figure 16a et b). On retrouve en partie ces limites sur le relevé de la CNARBRL mais d'autres limites apparaissent également sous la forme de micro-reliefs (Figure 16c et d). Ces limites sont isoclines au chemin dit « de la Prade » qui correspond à l'itinéraire allant des Gabieux (X-XI^{ème} s.) à la Piscine (I^{er}-IV^{ème} s.), via Candillargues et la Courtade (IV-XIII^{ème} s.). Compte tenu de la datation des sites qui jalonnent cet itinéraire et ses liens avec l'orientation dominante du Nîmes A, on peut estimer que la voie est d'origine antique tout comme les limites parcellaires qui lui sont associées. L'itinéraire est encore actif au Moyen Âge car il est attesté dans les textes du XIII^{ème} s. Toutefois, cet axe de circulation majeur qui desservait tous les sites portuaires implantés sur la rive nord de l'Etang, attestant son rôle clef dans la dynamique du peuplement de la région, commence à être délaissé avec l'abandon des sites portuaires et l'émergence des *castra* de Lunel et Mauguio qui prennent le

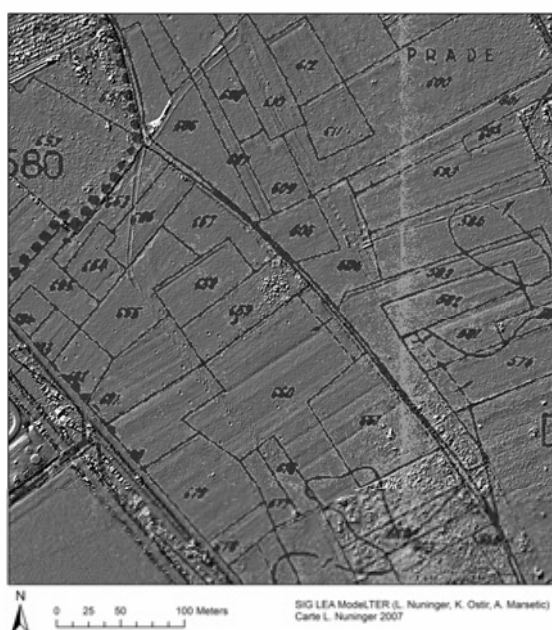
contrôle des échanges à partir des X-XIème s. (d'après A. Parodi dans Favory, Raynaud et al. 1993).



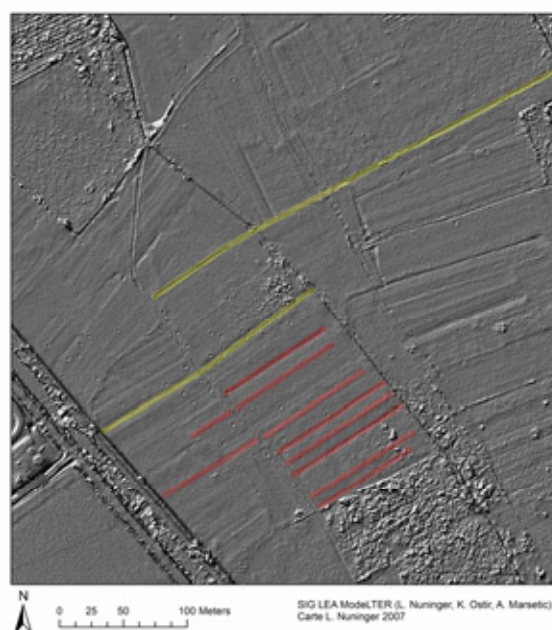
a) ortho-photo IGN de 2005



b) Combinaison du MNT lidar à 50 cm ombré et de l'ortho-photo IGN de 2005



c) Combinaison du MNT lidar à 50 cm ombré et du cadastre de la CNARBRL



d) MNT lidar à 50 cm ombré et relevé de limites parcellaires
- en jaune le prolongement du chemin « de la Prade » et une limite parcellaire relevée sur la CNARBRL par F. Favory
- en rouge le relevé de limites parcellaires isoclines au chemin à partir du MNT Lidar par L. Nuninger

Figure 16 - Détection de limites parcellaires à la Prade (Lansargues), au nord ouest du village de Candillargues

◆ Détection de paléochenaux

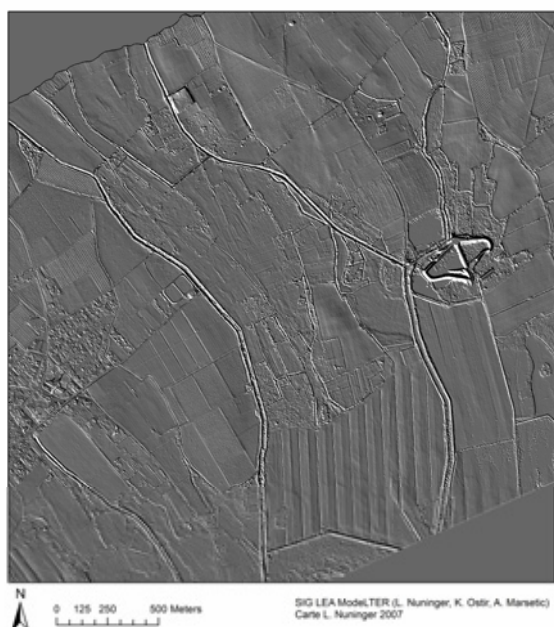
L'aménagement probablement précoce de l'espace de la Prade est particulièrement intéressant, car il est situé dans une zone de dépression naturelle constituant un delta qui réceptionne trois ruisseaux, d'ouest en est : Le Bérange, La Bernouide et la Viredonne (Figure 17a).



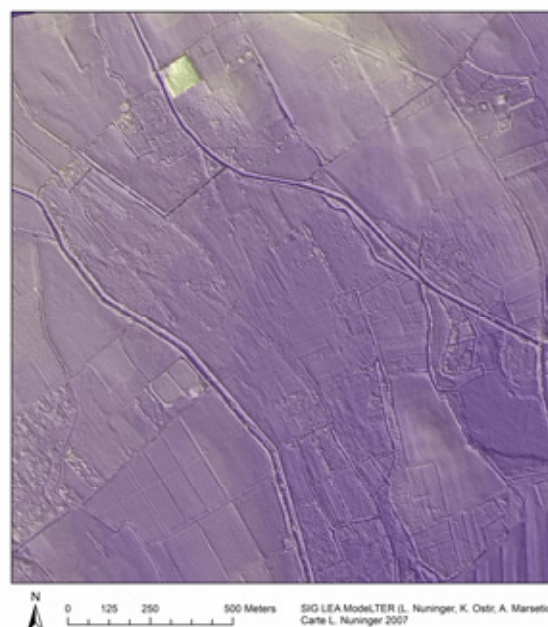
a) Combinaison du MNT lidar à 1 m ombré et de la carte IGN à 1/25000



b) Combinaison du MNT lidar à 1 m ombré et de l'ortho-photo IGN de 2005



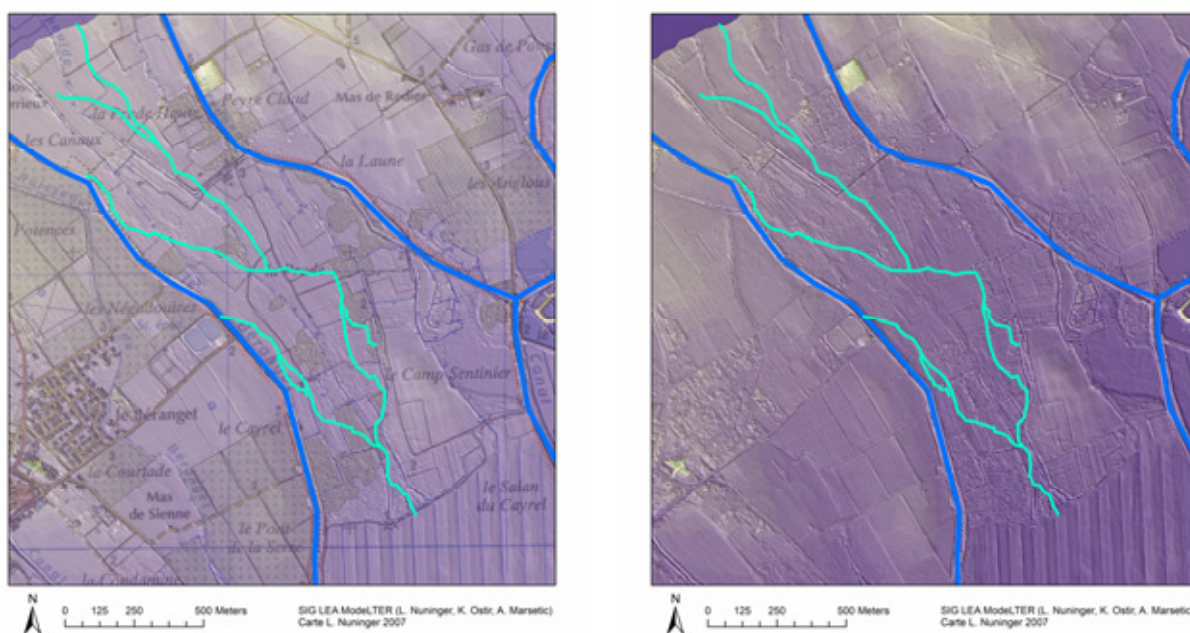
c) MNT lidar à 1 m ombré (production du MNT à 50 cm A. Marsetic, rééchantillonnage à 1 m, L. Nuninger)



d) Combinaison du MNT lidar à 1 m ombré et du MNT à 1 m reclassé par altitude selon un pas de 0.5 m (en violet foncé les altitudes les plus basses comprises entre 0 et 0.5m, en vert anis les altitudes les plus hautes comprises entre 6.5 et 7 m)-

Figure 17 – Canalisation du Bérange et de la Viredonne au nord-est du village de Candillargues, de la Prade-Haut au nord au Salan du Cayrel au sud.

C'est donc une zone très humide comme le soulignent les toponymes qui la qualifient : La Prade, Prade-Haut, les Canaux. « Prade » comme « Palus » indiquent généralement une zone humide asséchée. En témoigne le tracé rectiligne des trois cours d'eau qui sont totalement canalisés dans deux canaux principaux, le Bérange à l'ouest et la Viredonne à l'est, et sous la forme d'un réseau de fossés délimitant des parcelles qui draine l'ensemble de l'espace intermédiaire jusqu'à la lagune, « Salan du Cayrel » (Figure 17a). Malgré l'aménagement important des cours d'eau, la micro-topographie révélée par le traitement des données Lidar permet de mettre en évidence plusieurs éléments de paléo-chenaux naturels ou peu canalisés détectés de manière très partielle sur la documentation planimétrique (cadastre Napoléonien, CNARBR, cf. Delafolie I. et al. 1990 et Favory, Raynaud et al. 1993). Dans cet exemple, on perçoit très bien le cours naturel d'un bras probable du Bérange, qui actuellement canalisé selon une orientation nord-sud marquée, semblait observer un pendage naturel ouest-est avant de s'écouler très certainement de part et d'autre de la butte de Camp Sentinier (Figure 18a et b). Au nord et à l'ouest de cette butte un réseau de drainage dense ne permet pas d'observer des indices confirmant cette hypothèse. La topographie naturelle a été profondément remaniée par l'aménagement.



a) Combinaison de la carte IGN à 1/25000, du MNT lidar à 1 m ombré et du MNT à 1 m reclassé par altitude selon un pas de 0.5 m (en violet foncé les altitudes les plus basses comprises entre 0 et 0.5m, en vert anis les altitudes les plus hautes comprises entre 6.5 et 7 m). Relevé linéaire des cours d'eau canalisés (en bleu) et du tracé des paléo cours d'eau, identifiés grâce à la microtopographie (en vert).

b) Relevé linéaire des cours d'eau canalisés (en bleu) et du tracé des paléo cours d'eau, identifiés grâce à la microtopographie (en vert). Combinaison du MNT lidar à 1 m ombré et du MNT à 1 m reclassé par altitude selon un pas de 0.5 m (en violet foncé les altitudes les plus basses comprises entre 0 et 0.5m, en vert anis les altitudes les plus hautes comprises entre 6.5 et 7 m).

Figure 18 – Détection des paléo cours d'eau du Bérange et de la Bernouide (nord-est du village de Candillargues).

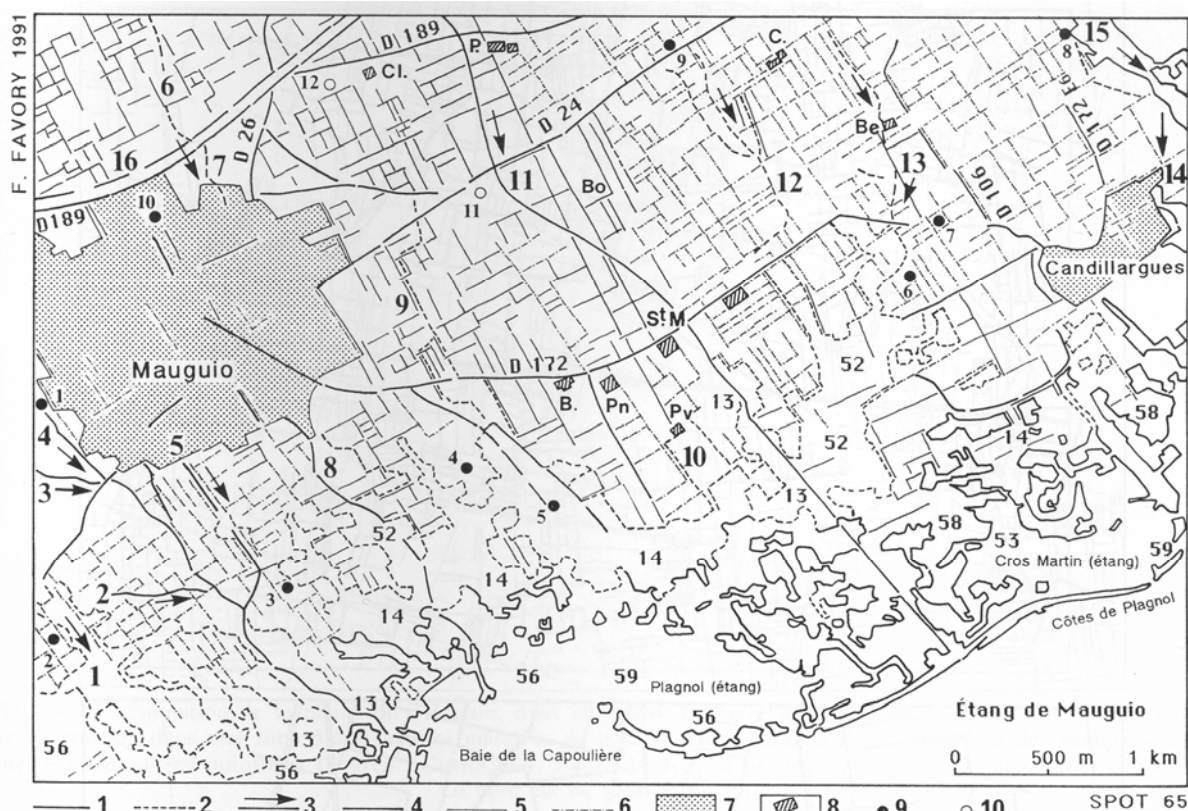
Ces quelques exemples illustrent le potentiel qu'offrent les données Lidar pour détecter très rapidement ou compléter des informations acquises grâce à d'autres types de supports planimétriques (cartes, cadastres, photographies aériennes...). Ils montrent également que le traitement de ces données n'est pas simple et direct. Les capacités de détection seront d'autant plus performantes que le filtrage des données et la production du MNT seront mieux maîtrisés, dans une démarche exploratoire visant à caractériser les contextes et les objets recherchés.

2.3.2 Analyses spatiales en développement et cas d'études

Après avoir opéré le travail de reconnaissance exploratoire sur l'ensemble de la zone, nous avons sélectionné trois zones d'études qui font l'objet d'analyses plus poussées mettant en œuvre des traitements spécifiques des données. Dans cette approche, en cours, notre objectif est de développer des modèles de détection semi-automatisée des objets recherchés : voies anciennes, limites parcellaires, micro-reliefs, paléo-chenaux... A ce stade de nos travaux nous présenterons, dans ce rapport, deux de ces cas d'étude.

♦ Cas d'étude 1 : Sud-est du village de Mauguio

La première zone d'étude se situe à l'est et au sud-est du village de Mauguio. Cet espace a déjà fait l'objet d'un relevé de limites parcellaire à partir de la documentation planimétrique réalisé par F. Favory et M.-J. Ouriachi (Delafolie I. et al. 1990, Favory and Raynaud 1992) et à partir de traitement d'image aérienne et satellite SPOT (Charraut and F. 1993).



Hydrologie fossile et parcellaires d'origine antique dans la région de Mauguio (Hérault), d'après une image SPOT. Croquis d'interprétation.

Symboles: - **1. Rivage lagunaire actuel** (ligne méridionale) et limite des terres submergées ou gorgées d'eau: sols minéraux (unité de sol n° 52, Amal 1984) ou peu humifères à gley (unités de sol n° 53 et 56) et sols salins à pseudogley de surface (unité de sol n° 59), sur alluvions palustres, lagunaires ou fluviales: étangs, marais, prés salés, phragmitaies et roselières. Ligne hypothétique du rivage lagunaire antique. - **2. Limite des sols hydromorphes** des vallées alluviales plus ou moins bien drainés: sols minéraux (unité de sol n° 52) et sols alluviaux à forts caractères d'hydromorphie (unités n° 13 et 14). - **3. Cours d'eau**. - **4. Routes**. - **5.** Limites parcellaires et chemins isoclines avec la centuriation *Sextantio-Ambrussum* (Ng. - 22° 30' W). - **6.** Limites parcellaires et chemins isoclines avec la centuriation *Nîmes A* (Ng. - 30° 30' W). - **7. Agglomérations**. - **8. Habitat actuel dispersé:** - Be. : Mas de Bellevue. - B. : Mas de Bomier. - Bo. : Mas de Bouet. - C. : Mas de Cannes. - Cl. : La Clausade. - P. : Mas de la Plaine. - Pn. : Pétrusse Neuf. - Pv. : Pétrusse Vieux. - St-M. : Mas de Saint-Martin. - **9. Habitat gallo-romain du haut Empire:** - 1. Arnassère II-III (I-IIe s.). - 2. Ste-Christine (Ier s.). - 3. Benteac 1-11 (Ier s. av. n. è.-IIIe s.). - 4. Bousquet IVa (I-IIe s.). - 5. Mas de Caporal (I-IIe s.). - 6. La Grand Coste (I-IIe s.). - 7. Saint-Corme II (II-IVe s.). - 8. Castelnau (I-IIe s.). - 9. Las Planas I (Ier s. av. n. è.-Ier s.). - 10. Maussan III (Ier s.). - **10. Habitat tardo-antique:** - 11. Treize Caïres (IV- VIe s.). - 12. La Clausade I (IVe s.). **Hydrographie:** - 1. Le Vieux Salaison. - 2. Bras médian fossile du Salaison. - 3. Le Salaison. - 4. La Balaurie. - 5. Canal de la Roubine (Vieille Cadoule). - 6. Chemin du Tamaris (Vieille Cadoule). - 7. Le Fossé de Maussan (Vieille Cadoule). - 8. La Capoulière (Vieille Cadoule). - 9. La Font de Mauguio. - 10. Bras ancien de la Cadoule. - 11. La Cadoule canalisée. - 12. Ruisseau d'Aigues Vives. - 13. Ruisseau de l'Arrière. - 14. Le Béranget. - 15. Le Bérange.

Figure 19 – Hydrologie fossile et parcellaires d'origine antique dans la région de Mauguio (Hérault) d'après une image SPOT (Charraut, Favory 1993, fig. 24b)

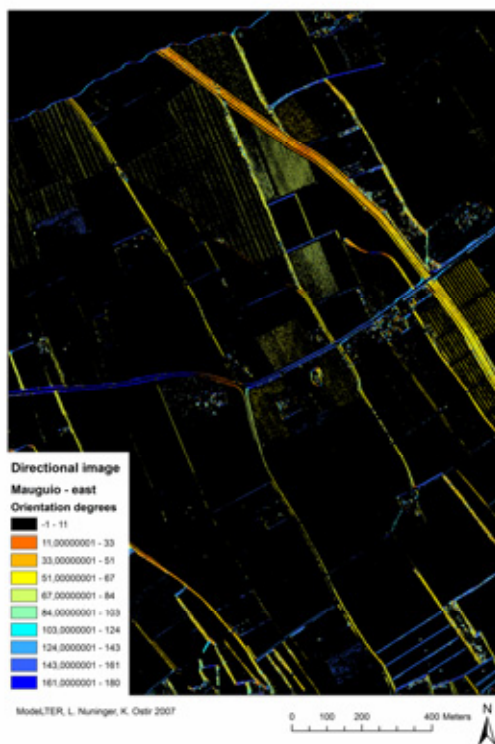
L'espace a été sélectionné car il est particulièrement riche en linéaments associés à la centuriation du *Sextantio-Ambrussum* et dans certaines zones (à l'est), on observe une zone de contact dans laquelle se combinent traces parcellaires du *Sextantio-Ambrussum* et du Nîmes A (Figure 19).

Dans cette zone, notre objectif est d'évaluer le potentiel offert par les données Lidar par rapport à la documentation existante. Il s'agit d'une part de mettre en place un protocole permettant de détecter de manière automatique les limites parcellaires connues à partir des données Lidar, d'autre part de compléter les relevés existants par de l'information inédite révélée par la micro-topographie. En s'appuyant sur l'expérience et la connaissance du paysage antique de cette région, nos travaux visent à élaborer un protocole de détection applicable dans d'autres zones qui n'ont pas bénéficié d'une telle investigation.

Dans un premier temps, nous nous sommes concentrés sur la mise en œuvre pratique du protocole de filtrage directionnel mis au point et utilisé par D. Charraut, Ph Jourdain et F. Favory sur des photographies aériennes et des images SPOT (Charraut and F. 1993, Jourdain 1995). Le module de filtrage initialement développé dans l'environnement MatLab a été adapté et développé dans le logiciel Erdas Imagine pour faciliter le traitement des données (Annexe 4). Le protocole de filtrage opère en deux étapes. Tout d'abord, l'application d'un opérateur dit de Sobel permet de mettre en évidence les bords détectés au sein de l'image traitée pour produire une image des contours ou de bords. Ensuite une image des directions de ces bords ou contours est calculée afin d'identifier les orientations privilégiées. L'image des directions est réalisée à partir d'un codage angulaire des points de chaque pixel dont la valeur n'est pas nulle dans l'image des contours (cf. Annexe 1, (3)). Dans cette nouvelle image, chaque segment de bord est qualifié par son orientation exprimée en degrés, ce qui permet ensuite d'extraire les segments d'une orientation donnée (Charraut and F. 1993).

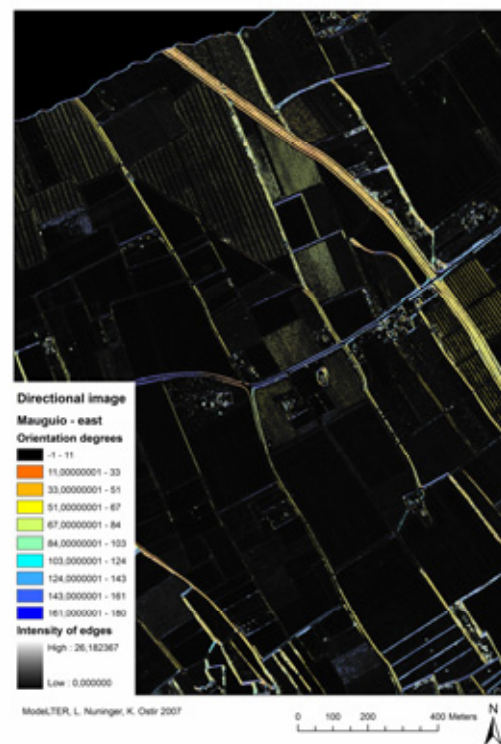
Le module développé sous ERDAS permet de produire l'image des directions et de la combiner visuellement à l'image des contours dont l'intensité est plus ou moins marquée. Ainsi, il est possible d'observer dans une même illustration l'orientation prédominante et son intensité qui correspond en général à son statut et sa pérennité dans le paysage actuel (Figure 20). Les premiers tests réalisés sur le MNT Lidar à 50 cm ont permis de retrouver des segments détectés sur l'image SPOT et d'en faire apparaître quelques autres (Figure 21). Toutefois, l'image obtenue est encore fortement brouillée par le bruit dû à la résolution fine du MNT. En effet, le filtrage fait également apparaître les pixels des marques de labour dont l'orientation suit celle des limites de parcelles.

Pour cette zone, nous avons construit un second MNT en modifiant les paramètres de l'algorithme de filtrage en introduisant un degré de lissage plus important afin de générer moins de bruit local –labour...– (cf. 2.2.1 LASEdit). L'application du filtre directionnel demeure cependant insatisfaisante car il ne prend en compte que les limites parcellaires encore actives et fortement marquées dans le paysage. Les limites parcellaires abandonnées mais perceptibles sous la forme de micro-reliefs émoussés échappent totalement à ce type de filtrage.

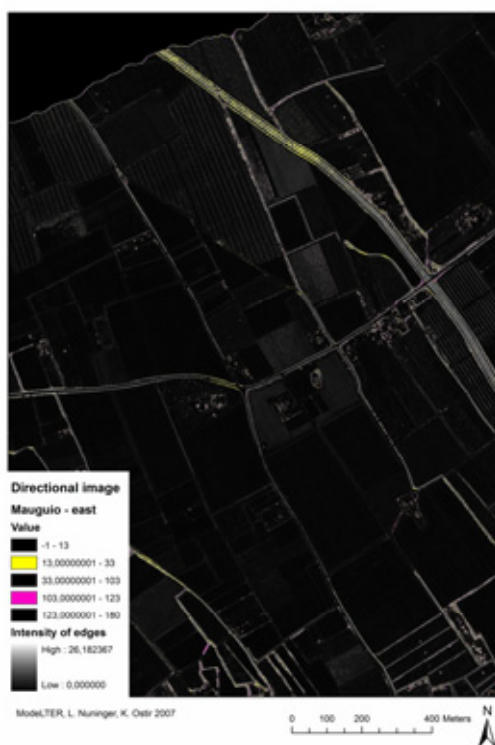


a) Image directionnelle calculée à partir du filtre adapté sous ERDAS Imagine

Figure 20 – Filtrage directionnel

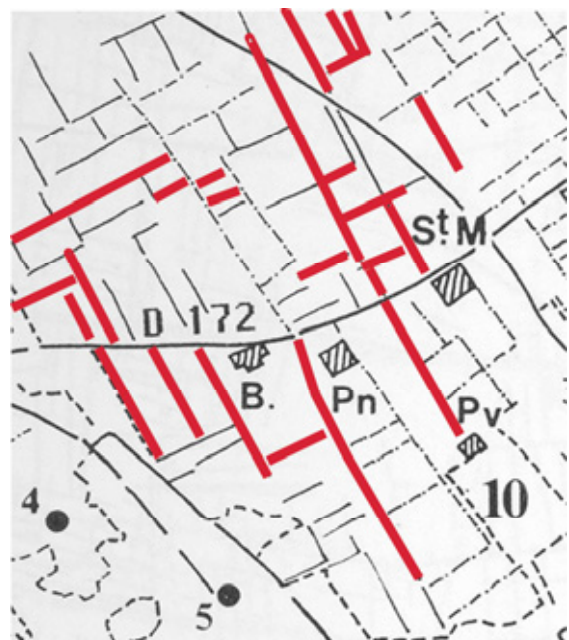


b) Combinaison de l'image directionnelle et de l'intensité de l'image de contours calculée à partir du filtre adapté sous ERDAS Imagine

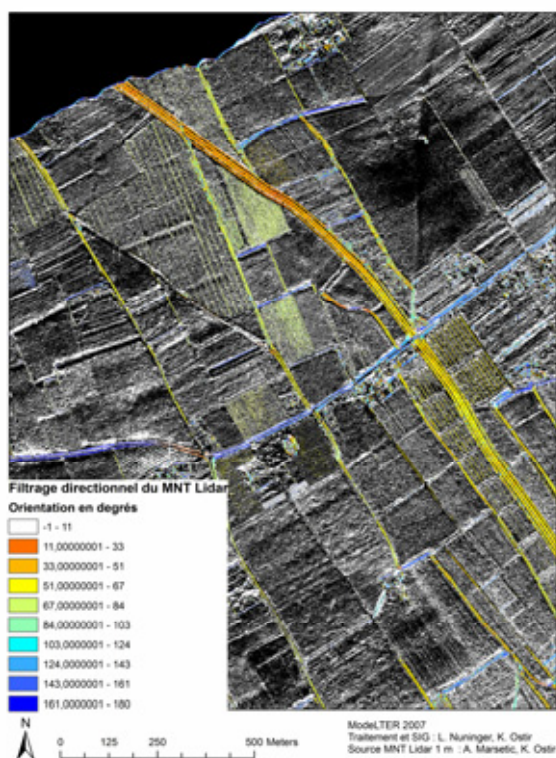


c) Combinaison de l'image directionnelle et de l'intensité de l'image de contours calculées à partir du filtre adapté sous ERDAS Imagine. En couleur, sélection des pixels dont la direction suit le cadastre *Sextantio-Ambrussum* avec une tolérance de plus ou moins 10°.

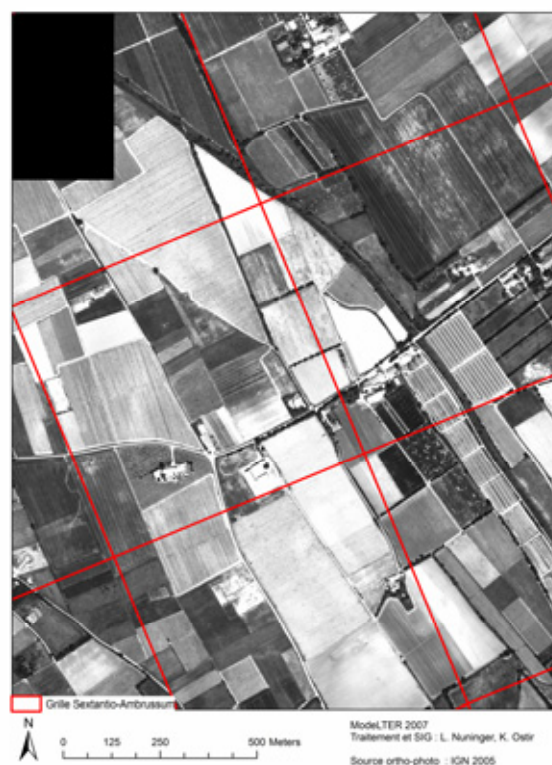
Figure 21 – Filtrage directionnel et cadastre *Sextantio-Ambrussum*



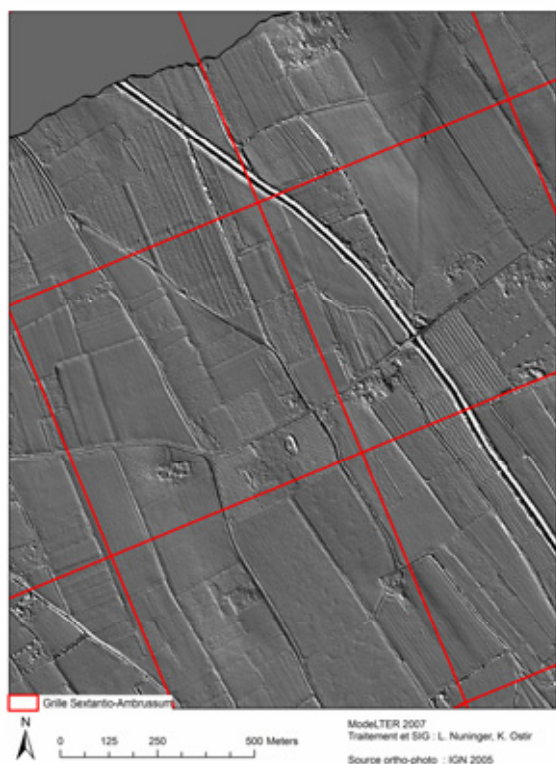
b) En rouge, relevés du cadastre *Sextantio-Ambrussum* réalisés d'après l'image SPOT et observés sur les données Lidar filtrées.



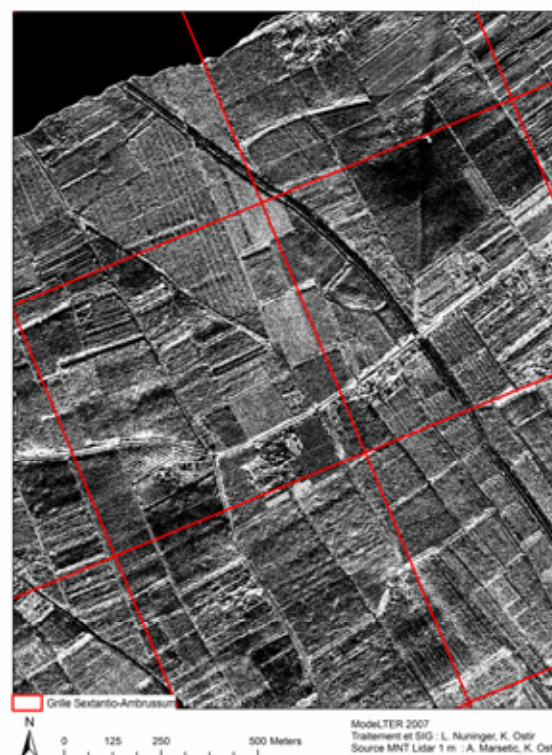
a) Image directionnelle (cf Figure 20) et résultat du second protocole de filtrage (cf. Figure 23)



b) Ortho-photo IGN de 2005 et grille du cadastre *Sextantio-Ambrussum*



c) MNT Lidar à 1 m ombré (production du MNT à 50 cm, A. Marsetic ; rééchantillonnage à 1 m, L. Nuninger) et grille du cadastre *Sextantio-Ambrussum*.



d) Résultat du second protocole de filtrage (cf. Figure 23) et grille du cadastre *Sextantio-Ambrussum*

Figure 22 – Filtrage directionnel et cadastre *Sextantio-Ambrussum*

Pour mettre en évidence les limites parcellaires enfouies, nous avons expérimenté d'autres protocoles de filtrage plus exploratoires qui se sont révélés plus intéressants pour détecter de manière automatique des traces dont certaines sont perceptibles sur le cadastre napoléonien. Parmi les protocoles testés, nous allons en décrire un dont les résultats sont présentés dans la Figure 22. Le MNT Lidar à 50 cm a d'abord été rééchantillonné pour obtenir une résolution de 1 m en planimétrie. Cette opération permet de travailler sur des entités spatiales, en l'occurrence des limites parcellaires, plus larges, et minimise l'impact des variations locales. On a ensuite appliqué un filtre de convolution de type « passe bas » avec un opérateur de 3x3 qui permet d'adoucir les détails et de réduire le bruit granuleux (Figure 23a). Pratiquement le filtre « passe bas » est une fenêtre mobile qui va calculer la valeur d'un pixel central en fonction de la valeur des pixels voisins. C'est la valeur la plus commune, définie par le mode en termes statistique, qui sera attribuée au pixel central. Ainsi, le filtre « passe bas » aura pour effet de réduire les écarts produits par des pixels dont la valeur est exceptionnelle par rapport à son voisinage (ERDAS 2003, Conolly and Lake 2006). Enfin, on applique à l'image résultante un filtre fondé sur deux matrices de convolution directionnelle (Figure 22b et c). Ces deux matrices ont été calculées à partir de l'orientation de la limitation du *Sextantio-Ambrussum* (Ng 22° 30' W, Ny-Lambert 23° 40' W, d'après F. Favory) et sa perpendiculaire.

1	1	1
1	1	1
1	1	1

a) Matrice du filtre passe bas
(Erdas Imagine)

-1.318	-0.402	0.514
-0.916	0	0.916
-0.514	0.402	1.318

b) Matrice du filtre *Sextantio-Ambrussum* (K. Ostir)

-1.318	-0.916	-0.514
-0.402	0	0.402
0.514	0.916	1.318

c) Matrice du filtre perpendiculaire
Sextantio-Ambrussum (K. Ostir)

Figure 23 – Matrice des filtres de convolution utilisées pour le filtrage du MNT Lidar

Bien que les résultats obtenus grâce au second protocole soient plus satisfaisants pour la détection visuelle des limites masquées, l'image produite est extrêmement bruitée et il est difficile d'extraire ces limites de manière automatique pour le relevé. Les deux protocoles doivent donc être affinés et intégrés pour extraire des données Lidar tout leur potentiel.

Grâce aux recherches menées antérieurement et aux nombreux relevés effectués selon différentes méthodes et sur plusieurs type de documents, il nous est possible de contrôler à chaque étape du traitement des données Lidar les modèles d'analyse que nous développons, ce qui nous permettra à terme de produire des outils solides à appliquer dans d'autres zones ou régions moins connues sur le plan archéologique pour une détection plus rapide des limites parcellaires.

◆ Cas d'étude 2 : St-Denis de Genestet et la vallée du Berbian

Le cas de St-Denis de Genestet a été retenu car il s'agit d'un village médiéval déserté repérable sous la forme d'une anomalie parcellaire dans le cadastre napoléonien et mentionné comme tel sur la carte de Cassini. Ce site a fait l'objet de prospections et de sondages qui ont permis d'identifier deux églises et deux quartiers d'habitat dont la datation est comprise entre le VIII^e-IX^e s. et le XIV^e s. avec une occupation plus ou moins intense selon les périodes et les quartiers (Favory F., Parodi, and Raynaud C. 1993 (inédit)). Comme plusieurs de ses

contemporains, ce site est localisé dans le lit majeur d'un cours d'eau le Berbian. Excepté au sud de l'emprise du village marqué par un fossé perceptible dans le parcellaire actuel, les données Lidar ne permettent d'identifier aucun indice micro-topographique révélant l'anomalie, comme cela avait également pu être constaté sur le terrain.

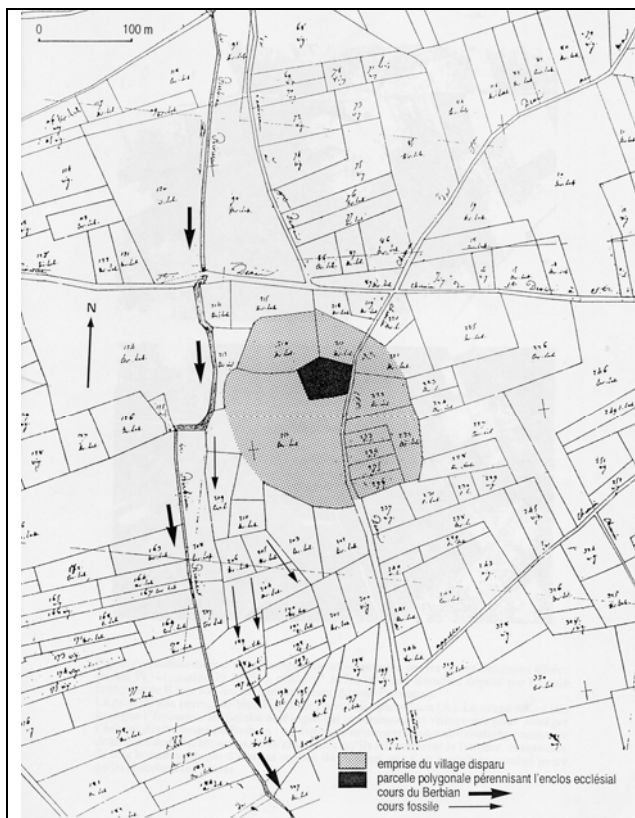


Figure 24 – Extrait commenté du plan cadastral napoléonien (F. Favory)

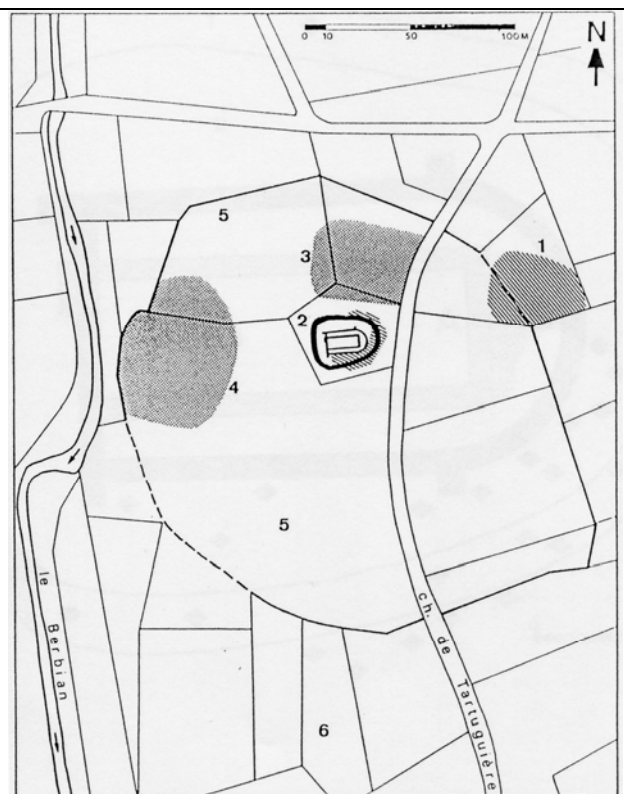


Figure 25 – Enclos villageois de Saint Denis (F. Favory, A. Parodi, C. Raynaud)

1- cimetière périphérique, 2- église et cimetière central, 3 et 4 – secteurs d'habitat, 5 - zone d'épandage agricole médiéval, 6 - zones d'épandage agricole antique

En revanche, l'analyse micro-topographique permet de mieux visualiser le cours originel, avant canalisation, du Berbian dont le tracé était moins nettement repéré sur la morphologie parcellaire du cadastre napoléonien. Pour cerner le tracé de l'ancien cours d'eau représenté sur la figure ci-dessous, nous avons calculé des courbes de niveau équidistantes de 10 cm à partir du MNT rééchantillonné à 1 m. Ces courbes ont localement été nettoyées pour supprimer le bruit dû à la haute résolution des données, puis généralisées afin de dessiner la forme générale du cours d'eau ancien. Croisée par transparence avec le MNT à 50 cm ombré, cette nouvelle couche d'information permet de mettre en évidence, à droite de l'image, le cours actuel du Berbian canalisé par une solide digue dont l'origine est sans nul doute médiévale, afin de protéger le village notamment le quartier d'habitat situé à l'ouest (Figure 25 et Figure 26). Au sud du village, l'enregistrement d'une zone d'épandage agricole antique localisé en amont de l'ancien cours d'eau tend à montrer que les opérations de drainage ont été lancées de manière précoce dans cette zone, avant l'installation de l'habitat médiéval.

Afin de tester la qualité des sols de cette zone, en terme d'humidité relative, nous avons observé les valeurs d'intensité également fournies lors de l'acquisition Lidar. En effet, les variations de la capacité réfléchissante des différents composants de la surface du sol lors de l'acquisition Lidar sont assez bien documentées et les sols humides sont connus pour leur

capacité réfléchissante réduite (Wehr and Lohr 1999, Challis et al. 2006). Dans le cas étudié ici, nous voulions tester la corrélation des faibles valeurs d'intensité et des zones les plus basses révélant le tracé de l'ancien lit mineur du Berbian avant sa canalisation. En s'appuyant sur des zones humides reconnues, nous avons déterminé un seuil pour reclasser l'image en deux classes. La première qui regroupe les valeurs allant de 0 à 14 représente la classe dont la capacité de réfléchissante est moindre, c'est-à-dire celle où le faisceau lumineux a été absorbé. La seconde classe correspond à toutes les valeurs supérieures à 14, s'échelonnant jusqu'à 510, c'est-à-dire dans des zones où le signal est réfléchi avec une intensité plus ou moins importante. C'est l'observation de la première classe qui nous intéresse ici et les résultats, s'ils ne sont pas totalement négatifs, ne sont pas non plus très probants. En effet, si visuellement on observe que les zones correspondant aux valeurs de la première classe (Figure 27, en bleu) sont de manière générale situées dans le lit majeur du Berbian : 1) la continuité du signal n'est pas évident, 2) les valeurs les plus faibles ne sont pas forcément localisées dans les zones les plus basses et 3) on remarque enfin une nette corrélation des plus faibles valeurs et du couvert végétal haut (arbustes, arbres). Observées seules, les valeurs d'intensité n'ont que peu d'intérêt pour notre propos. En revanche, dans tous les cas, il faut souligner qu'elles sont le plus souvent en connexion avec des zones marquées par un caractère d'humidité relativement important que ce soit au niveau du sol ou d'objets contemporains comme la végétation. Cette remarque montre que les données d'intensité doivent être explorées de manière plus approfondie.



Les flèches noires indiquent le lit majeur du cours d'eau fossile, les flèches blanches montrent la zone hors d'eau

Figure 26 – Micro-topographie de la Clausade de St-Denis de Genestet (partie sud) et vallée du Berbian



En bleu figurent les pixels de l'image d'intensité dont la valeur est comprise entre 0 et 14.

Figure 27 – Intensité de la Clausade de St-Denis et vallée du Berbian

2.4 Conclusions

Les données issues de la télédétection Lidar contiennent une foule d'informations qui doivent être extraites du nuage de points brut avant d'interprétation. Comme nous avons pu le montrer à travers plusieurs exemples, un modèle numérique de terrain produit qui se présente généralement sous la forme d'une couche d'information de type raster, bien qu'il corresponde au produit le plus attendu par les archéologues, n'est en fait qu'une facette du potentiel offert par les données Lidar. Le premier modèle produit sur une région doit être exploré et interprété avec une grande attention afin de mieux définir la production d'autres modèles adaptés au contexte et à l'objet recherché. Pour plusieurs applications, on peut donc obtenir un modèle qui soit le résultat d'un compromis optimum pour une phase exploratoire des données, mais il ne faut jamais perdre de vue qu'un modèle optimal doit pouvoir être produit pour répondre correctement à une application spécifique.

Nous rappelons qu'il est donc essentiel dans tout projet de veiller à obtenir les données brutes. De la même manière, il est important de bien définir au préalable avec le fournisseur de données les paramètres de l'acquisition, en fonction des résultats attendus et du contexte. Ces deux remarques montrent également qu'il est possible de réutiliser les données acquises par un autre projet ou organisme, mais qu'il est aussi parfois nécessaire de procéder à une seconde acquisition sur une zone déjà investie.

Au-delà de la production des MNT et de son interprétation visuelle, le traitement de ces MNT par filtrage notamment et l'observation des données d'intensité montrent que l'on peut extraire des informations non perceptibles dans la topographie actuelle ou concernant le proche sous-sol (humidité du sol par exemple). Les analyses exploratoires développées sur notre zone d'étude, qu'elles soient micro-topographiques ou sur pédologiques, soulignent ce potentiel des données Lidar pour produire des modèles numériques de terrain plus conformes à la réalité topographique passée en s'appuyant sur les données chronologiques relatives fournies par les enquêtes archéologiques extensives, prospection au sol notamment. Toutefois, pour réaliser ces MNT et tirer le maximum d'information des différentes données Lidar (altimétrie, intensité), les corrélations de valeurs doivent être évaluées statistiquement et combinées à d'autres indicateurs, notamment la végétation actuelle pour extraire les valeurs significatives uniquement. Enfin, ces valeurs doivent être testées sur le terrain avec des sondages géo-archéologiques ciblés pour vérifier leur signification archéologique.

En ce qui concerne les objets en élévation, révélés par la micro-topographie, leur caractérisation sur le plan formel et chronologique, grâce aux connaissances archéologiques enregistrées dans la région, doit nous permettre de distinguer de manière semi-automatique les objets d'origine anthropique à la fois modernes (ex.: bâtiments, les lignes électriques,...) et passés (par exemple, des modifications agricoles du terrain, des aménagements de drainage ou de canalisation à différentes périodes archéologiques ...). Ce chantier vient d'être engagé en combinant aux données Lidar, les données issues de l'imagerie hyperspectrale. En éliminant, les objets extraits par phase chronologique (contemporaine et moderne, médiévale, antique), notre objectif est de corriger au moins localement le MNT actuel pour produire des paléo MNT.

Bibliographie

- Bewley, R. 2003. Aerial survey for archaeology. *The Photogrammetric Record* (18-104): 273-92.
- Challis, K. 2004. Trent Valley GeoArchaeology 2002. Component 2b: LiDAR Terrain Modelling: York Archaeological Trust. English Heritage, Environment Agency Report.
- . 2006. Airborne Laser Altimetry in Alluviated Landscapes. *Archaeological Prospection* (13-2): 103-7.
- Challis, K., A. J. Howard, D. Moscrop, B. Gearey, D. Smith, C. Carey, and A. Thompson. 2006. Using airborne LiDAR intensity to predict the organic preservation of waterlogged deposits. In *From Space to Place – Proceedings of the 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology, 4.-7. December 2006*, edited by S. Campana and M. Forte. Rome: 93-8.
- Charraut, D., and Favory F. 1993. De la carte topographique à l'analyse d'images : méthodologie de l'identification des limitations antiques. *Revue Archéologique de Narbonnaise* (26): 19-56.
- Conolly, J., and M. Lake. 2006. *Geographical Information Systems in Archaeology, Manuals in Archaeology*. Cambridge
- Coulon, M. 2006. Contribution à la recherche des paléoreliefs dans la plaine littorale de Mauguio : analyse spatiale et statistique des données pour l'élaboration d'une typologie des indices de paléoreliefs.: Master pro, rapport de stage « Géomatique et conduite de projet en développement », Université d'Avignon, inédit.
- Crutchley, S. 2006. Light detection and ranging (lidar) in the Witham Valley, Lincolnshire: an assessment of new remote sensing techniques. *Archaeological Prospection* (13-4): 251-7.
- Delafolie I., Favory F., Garrido M.-C., Malvis J.-M., Poupet P., Raynaud C., Rinaldi R., and Roger K. 1990. Contribution à la carte archéologique du Languedoc oriental. Rapport de contrat de prospection et d'inventaire archéologiques: SRA Languedoc, inédit.
- Delahaye, A., Hoffmann A., J.W. Van Der Vegt, and Van Dellen A. 2003. Laser on the Loire. *Geoconnexion* (feb. 2003).
- Devereux, B.J., G.S. Amable, P. Crow, and A.D. Cliff. 2005. The potential of airborne lidar for detection of archaeological features under woodland canopies. *Antiquity* (79): 648-60.
- Doneus, M., and C. Briese. 2006. Digital terrain modelling for archaeological interpretation within forested areas using full-waveform laserscanning. In *VAST 2006 : 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage*, edited by M. Ioannides, D. Arnold, F. Niccolucci and K. Mania: 155-62.
- ERDAS. 2003. *Erdas Field Guide. Seventh Edition*: Leica Geosystems.
- Favory F., A. Parodi, and Raynaud C. 1993 (inédit). Saint Denis de Genestet. Une étude sur la genèse du village médiéval.
- Favory, F., J.-M. Malvis, C. Mercier, C. Raynaud, and K. Roger. 1993. Limitation antique et morphologie parcellaire dans le Lunellois (Hérault) : données de fouilles récentes. *RAN* (26): 139-70.
- Favory, F., and C. Raynaud. 1992. La production du paysage en Languedoc oriental dans l'Antiquité et Moyen Âge : Etude de Mauguio (Hérault). *Mappemonde* (1-1992): 12-6.
- Favory, F., C. Raynaud, J. André, B. Thy Maï, F. Brien-Poitevin, L. Chabal, V. Forest, A. Gardeisen, B. Garnier, A. Garnotel, M. Leenhardt, C. Mercier, A. Parodi, Poupet P.,

- and Roger K. 1993. Autour de l'Etang de l'Or. Espace rural et habitat dans le Montpellierais à l'époque romaine au Moyen Âge. Rapport final 1993: CNRS Action Thématique Programmée « Grands Projets d'Archéologie Métropolitaine ».
- Holden N., Horne, P., Bewley, R. 2002. High-Resolution Digital Airborne Mapping and Archaeology. In *Aerial Archaeology. Developing Future Practice*, edited by R. Bewley and W. Raczkowski: Nato Series 1: 173-80.
- Jourdain, Ph. 1995. Traitements numériques d'images. Détection et métrologie de parcellaires. Restauration d'empreintes de filigranes, Université de Franche-Comté.
- Malvis, J.-M. 1988. Anthropisation de l'espace lunellois (commune de Lunel et de Marsillargues), périodes romaine et médiévale. *Études sur l'Hérault* (4): 15-36.
- Motkin, D. 2001. The assessment of LIDAR for archaeological use. *AARGNews* (22): 24-5.
- Nuninger, L., and K. Ostir. 2005. Contribution à la modélisation des paléo-reliefs de la plaine littorale de l'Etang de Mauguio (Languedoc, France) : premières approches par télédétection. In *Temps et espaces de l'homme en société, analyses et modèles spatiaux en archéologie. XXVe Rencontres Internationales d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes*, edited by J.-F. Berger, F. Bertoncello, F. Braemer, G. Davtian and M. Gazenbeek. Antibes: APDCA: 123-34.
- Ostir, K., and L. Nuninger. 2006. Paleorelief detection and modelling a case of study in eastern Languedoc (France). In *From Space to Place – Proceedings of the 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology, am 4.-7. December 2006*, edited by S. Campana and M. Forte. Rome: 255-60.
- Raynaud, C., J.-F. Berger, and J.-L. Fiches. 1999. La vallée du Vidourle, géoarchéologie d'un paysage méditerranéen. In *Programme Environnement, Vie et Société. Histoire des interactions sociétés/nature*, edited by CNRS. Lattes: UMR 154 de Montpellier/Lattes.
- Shell, C., and C. Roughley. 2004. Exploring the Loughcrew landscape: a new airborne approach. *Archaeology Ireland* (18/2-68): 22-5.
- Sittler, B. 2004. Revealing Historical Landscapes by Using Airborne Laser Scanning. A 3-D Modell of Ridge and Furrow in Forests near Rastatt (Germany). In *Proceedings of Natscan, Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment - Instruments, Processing Methods and Applications*, edited by M. Thies, B. Koch, H. Spiecker and H. Weinacker: 258-61.
- Sittler, B., and S. Schellberg. 2006. The potential of LIDAR in assessing elements of cultural heritage hidden under forest canopies or overgrown by vegetation: Possibilities and limits in detecting microrelief structures for archaeological surveys. In *From Space to Place – Proceedings of the 2nd International Conference on Remote Sensing in Archaeology, am 4.-7. December 2006*, edited by S. Campana and M. Forte. Rome: 117-22.
- Sittler, B., H. Weinacker, M. Gültinger, and L. Koupaliantz. 2007. The potential of Lidar assessing elements of cultural hidden under forests. In *New Developments in Remote Sensing*, edited by Z. Bochenek. Millpress, Rotterdam: 539-48.
- Wehr, A., and U. Lohr. 1999. Airborne laser scanning – an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (54 / 2-3): 68-82.

Annexes

Annexe 1 Avis de publicité sur le site PUMA du CNRS (publiée en français et en anglais)

Laure Nuninger
Laboratoire de Chrono-Ecologie (UMR 6565 / CNRS)
UFR SLHS
30 rue Megevand
25030 Besançon Cedex
France

Tel 03 81 66 51 20
E-mail laure.nuninger@univ-fcomte.fr

Besançon, 5 septembre 2006

DEMANDE DE DEVIS POUR L'ACQUISITION DE DONNEES ALTIMETRIQUES PAR LASER AEROPORTE (LIDAR) SUR LA PLAINE LITTORALE DE MAUGUIO, HERAULT, FRANCE

Généralités

Nature : Services

Intitulé : DEMANDE DE DEVIS POUR L'ACQUISITION DE DONNEES ALTIMETRIQUES PAR LASER AEROPORTE (LIDAR) SUR LA PLAINE LITTORALE DE MAUGUIO, HERAULT, FRANCE

Date de publication : 4 septembre 2006

Entité acheteuse : UMR 6565 – Laboratoire de Chrono-Ecologie (CNRS)

Domaine d'achat : DOCUMENTATION ET ARCHIVES

Région : France, Languedoc-Roussillon, Hérault, à l'est de Mauguio.

Besoin

Caractéristiques :

Dans le cadre d'un projet de recherche intitulé « Modélisation des paléoreliefs de la plaine littorale du Languedoc oriental », financé par le CNRS⁶ (France) et le ZRC SAZU⁷ (Slovénie) dans le cadre du LEA ModelTER⁸, nous avons besoin d'acquérir des données altimétriques scannées par laser aéroporté (LIDAR) sur la plaine littorale de l'Etang de Mauguio située entre Montpellier et Nîmes (Languedoc), sud-est de la France.

Au printemps 2006, nous avons déjà demandé une première estimation du coût d'une telle campagne auprès de plusieurs producteurs de données LIDAR. Aucune des offres reçues en retour n'ayant pleinement satisfaite l'ensemble de l'équipe, nous avons décidé de renouveler notre demande de devis avec une définition plus claire de nos besoins.

L'objectif de la campagne LIDAR de Mauguio est d'obtenir un ensemble de données altimétrique de la végétation et du sol sous la forme d'un nuage de point lidar sur un espace de 2.5 km x 15 km, relevé au cours de l'automne-hiver 2006 (Octobre, Novembre ou Decembre). Voir l'annexe technique (technicalrequirements.doc) pour la description détaillée des besoins et les conditions du contrat.

⁶ Centre National de la Recherche Scientifique, France

⁷ Centre de Recherche Scientifique de l'Académie Slovène des Sciences et des Arts, Slovénie

⁸ Laboratoire Européen Associé *Modelling of Landscapes and Territories over the Long Term*

La zone d'acquisition des données est définie dans les fichiers ci-joints compatibles avec ArcGIS (shapefiles et grid : Area.zip, Dem.zip, CoordinateSystem.zip). Les catégories principales d'occupation du sol sont décrites par des photographies (cf liens internet dans « Technicalrequirements.doc »).

Cf.

- 1- Technicalrequirements.doc (en anglais)
- 2- Area.zip
- 3- Dem.zip
- 4- CoordinateSystem.zip

Montant estimatif :

Maximum 20000 Euros HT

Date prévisionnelle de début de marché :

01/10/2006

Date prévisionnelle de première livraison :

15/12/2006

Durée du marché :

2 mois

Pièces(s) jointe(s) :

- 1- Technicalrequirements.doc (en anglais)
- 2- Area.zip
- 3- Dem.zip
- 4- CoordinateSystem.zip

Modalités**Modalités de participation :**

Transmission des documents par mel et un original par courrier

Les réponses et devis à cet appel devront comporter en plus :

- les références du prestataire dans la mise en oeuvre de ce type de projet
- la présentation des interlocuteurs qui seront en charge du dossier
- les coûts des services d'assistances et des prestations associées

Critère de sélection des offres :

Les critères de sélection sont les suivants :

- o le coût total de la campagne
- o l'espace couvert
- o la densité de points laser
- o l'assurance de la qualité des données
- o la flexibilité concernant la date d'acquisition
- o la facturation et la livraison avant le 31 décembre 2006 (ultime limite).
- o l'offre de services additionnels

Conditions d'exécution du marché :

Travail avec les partenaires suivants :

- Laboratoire de Chrono-Ecologie (UMR 6565 CNRS), Besançon (France)
- Laboratoire ThéMA (UMR 6049 CNRS), Besançon (France)
- Institut d'Etudes Anthropologiques et Spatiales – IASS (ZRC SAZU), Ljubljana (Slovénie)

Langages : anglais pour toute la documentation et les échanges techniques.

Le contrat sera signé par le laboratoire de Chrono-Ecologie (UMR 6565, CNRS). Le laboratoire de Chrono-Ecologie agit dans le cadre du projet en tant que coordinateur durant toute la phase de sélection et de négociation du contrat.

Avant la sélection, le laboratoire pourra demander aux fournisseurs de données des précisions supplémentaires concernant les aspects techniques, organisationnels et financiers concernant leur offre.

La date limite de réception des offres est fixée au 15 septembre 2006. Tous les fournisseurs de données LIDAR ayant répondu seront informés de la sélection retenue avant la fin du mois de septembre 2006.

Merci de noter et d'indiquer sur votre offre que la date limite de livraison et de facturation est fixée au 31 décembre 2006 (aucune extension possible n'est permise par le CNRS).

Date limite de réception des offres :

15/09/2006, 23h

Contacts

Contact principal :

Nom Laure Nuninger

Adresse Laboratory of Chrono-Ecology (UMR 6565 / CNRS), UFR SLHS, 30 rue Megevand, 25030 Besançon Cedex, FRANCE

Telephone (+33) 381 66 51 20

Fax (+33) 381 66 51 58 (à l'attention de Laure Nuninger)

Courriel laure.nuninger@univ-fcomte.fr

Autre contact

Nom Sylvie Varey (secrétariat, financier)

Adresse Laboratory of Chrono-Ecology (UMR 6565 / CNRS), UFR ST, 16 route de Gray, 25030 Besançon Cedex, FRANCE

Telephone (+33) 381 66 62 55

Fax (+33) 381 66 65 68

Courriel sylvie.varey@univ-fcomte.fr

Infos complémentaires :

Merci de noter, qu'exceptées les données demandées dans l'annexe technique (Technicalrequirements.doc, « Deliverables ») aucun traitement avancé des données LIDAR n'est demandé en termes de filtrage du nuage de point, extraction de forme, génération de MNT/MNS, etc.

Annexe 2 Annexe technique pour l'appel d'offre (fichier Technicalrequirement.doc)

AERIAL LASER ALTIMETRY DATA ACQUISITION IN LITTORAL PLAIN OF ETANG DE MAUGUIO, HERAULT, FRANCE

Contact : laure.nuninger@univ-fcomte.fr

Reminder description :

In the framework of a research project, titled "Paleoreliefs modelling in the littoral plain of eastern Languedoc", financed by CNRS⁹ (France) and ZRC SAZU¹⁰ (Slovenia) within the framework of the LEA ModelTER¹¹, there is a need for an aerial laser scanning (ALS) data acquisition in the littoral plain of Etang de Mauguio, between Montpellier and Nîmes (Languedoc), south-east of France.

On spring 2006, we issued, by e-mail an invitation to several ALS data providers to submit offers for an ALS campaign. None of the offers we received in return were completely suitable, therefore we decided to renew the invitation with more clearly defined requirements.

Technical requirements :

The aim of the Mauguio ALS campaign is to gather unstructured lidar point-cloud data of vegetation and terrain.

Area

The desired area to be scanned spans a rectangle of 2.5 km x 15 km. It is outlined in the attached shapefile AREA, given in Lambert Conformal Conic, France Zone III (Sud) – see CoordinateSystem.zip. See attached files (Area.zip, Dem.zip). Principal landcover categories are described by the following pictures :

- <http://sol.ensam.inra.fr/Paysages/Asp/Photos.asp?numSsMPR=1&themePhoto=2>
- <http://sol.ensam.inra.fr/Paysages/Asp/Photos.asp?numSsMPR=2&themePhoto=2>
- <http://sol.ensam.inra.fr/Paysages/Asp/Photos.asp?numSsMPR=5&themePhoto=2>
- <http://sol.ensam.inra.fr/Paysages/Asp/Photos.asp?numSsMPR=3&themePhoto=2>

Temporal window

The preferred temporal window for lidar data acquisition is autumn-winter (October, November, December) 2006. In case of a significant cost saving (e.g. due to merging of the Mauguio campaign with another campaign in the vicinity) offered by the vendor an alternative temporal window in September 2006 could also be considered. In any case, the ALS data acquisition should be carried out at a time when (1) there is no snow cover in the area and (2) the phenological stage of vegetation allows a minimum representation of both the bare-ground and the vegetation lidar returns in the point-cloud.

In their cost estimates the vendors are invited to include the necessary logistics, including aircraft, ground GPS, acquisition of control points on the ground, flight permissions, etc. The **total sum including taxes to be paid by the project consortium** is limited to € 20.000. **In any case, invoice deadline is 31/12/2006 (no extension permitted by CNRS).**

Alternative cost estimate

An alternative cost estimate may be offered instead, assuming that a separate contractor will provide the ground GPS and ground control point acquisition. In this case the total sum including taxes to be paid by the project consortium is limited to € 19.000. Also, we would need a detailed definition of what data and services the provider expects from the GPS contractor.

Minimum requirements

⁹ National Center for Scientific Research, France

¹⁰ Scientific Research Centre of the Slovenian Academy of Sciences and Arts, Slovenia

¹¹ European Associated Laboratory *Modelling of Landscapes and Territories over the Long Term*

There are **two** minimum requirements that must be met by the potential ALS data providers. Firstly, the stated maximum campaign cost cannot be exceeded. Secondly, the minimum point density (stated below) must be attained. Other parameters (e.g. area covered, percentage of aerial photo coverage, etc.) may be slightly reduced, if the provider feels it cannot fulfill them within the given financial frame.

Deliverables

The following deliverables are needed:

1. Point-cloud dataset produced by discrete lidar sensor operating in the first-last mode. The set of points is to be delivered in ASCII files, with separate files for each flight strip and separately for the first returns and for the last returns. The point-cloud should be corrected for positional errors (e.g. systematic errors, differences between strips, removal of outliers, ...). Each point should be written in a separate line, containing at least the following data: Time-stamp, X, Y, Z, Intensity (Intensity can be optional). The X-Y-Z point coordinates should be given in Lambert Conformal Conic; France Zone III (Sud). Other data for reconstruction of the scan geometry may also be provided for each point (e.g. scan angle, off-nadir angle). The elevation accuracy of the lidar points should be equal or better than 0,2 m and horizontal accuracy equal or better than 0,7 m (1 sigma). The minimum point density should be 5 pulses per m², with a minimum of 1 return per m² from bare-ground also in the forested areas.
2. Orthorectified and mosaiced color IR aerial photographs (TIF/TFW format) of the lidar-scanned area acquired simultaneously with lidar data. The spatial resolution of the photographs should be at least 0,5m.

Please note, that apart from the above deliverables no further lidar data processing is needed in the sense of point-cloud filtering, feature extraction, DEM generation, etc.

Attached files :

- 1- Technicalrequirements.doc (en anglais)
- 2- Area.zip
- 3- Dem.zip
- 4- CoordinateSystem.zip

Annexe 3 Rapport d'acquisition des données de points de contrôle selon les spécifications techniques de la société Heliogs

Nome del cliente : NUNINGER Laure / Chrono-Ecologie UMR6565 CNRS

Project : Aerial laser altimetry data acquisition in littoral plain of Etang de Mauguio, Herault, France

Region : Herault, France

Contact (information about the GPS mission) :

1- Laure NUNINGER, laure.nuninger@univ-fcomte.fr

2- Klemen ZAKSEK, kzaksek@zrc-sazu.si

General comments about the GPS survey :

IGN geodetic point in the area has vertical accuracy of 10 cm (it was the only one suitable for such survey), thus we decided to make differential post-correction based on IGN permanent GPS stations. There should be two IGN stations in the area (Montpellier and Nîmes), however both had a malfunction on the day of our measurements.

Therefore, we decided to use the IGN geodetic point next day, although it is not accurate. The average time of our measurements were 45 min. There are some points where the receiver stopped logging after 35 to 40 min and the estimated accuracy for those points is a little bit lower.

There is additional potential source of errors; we unfortunately did not have all the required equipment, we only had one complete tripod, which was used with the rover. The base tripod was missing the part, which enables horizontal position of the receiver and its position above the geodetic point. Therefore we improvised with a metal plate, which made the base receiver stable. We made the plate horizontal with a classical spirit level (used in construction business) and the old fashioned sounding line to position the receiver above the IGN point. Therefore, the horizontal positions might have a systematic error of 1 or 2 cm due to a strong wind. What concerns us more is the possibility of multipath. The metal plate is a part of a circular saw with a diameter of approximately 30 cm.

However, these measurements were done only in case there goes something really wrong with the LIDAR survey. Our objective is to use your data for a DEM generation; DEM will most likely have a spatial resolution of 1 m. The desired vertical accuracy is 20 cm. It is most important, that the model has a high relative accuracy, the absolute accuracy you offered (3 cm) is desired but even 20 cm will suit our purposes. We suggest to use the same IGN geodetic point as we used for our base, which yields into similar errors as we had, thus the relative errors between your and our measurements should be comparable.

Nome del cliente : NUNINGER Laure / Chrono-Ecologie UMR6565 CNRS

Project : Aerial laser altimetry data acquisition in littoral plain of Etang de Mauguio, Hérault, France

Region : Hérault, France

Nome Survey Point : Base (master), IGN geodetic point Marsillarges III, n° 3415103 B

Site Name (village, road nr, etc) : Marsillarges, road D61

WGS84

Latitude :

Longitude :

UTM 33 (WGS84)

North :

East :

Local coordinate system (geographic) : RGF93, IAG GRS80

Latitude : 43° 37' 41,8142" N

Longitude : 4° 07' 43,7842" E

Local Coordinate System (projected) : Lambert 3, NTF (cf. appendix 1)

North : 149 167,49

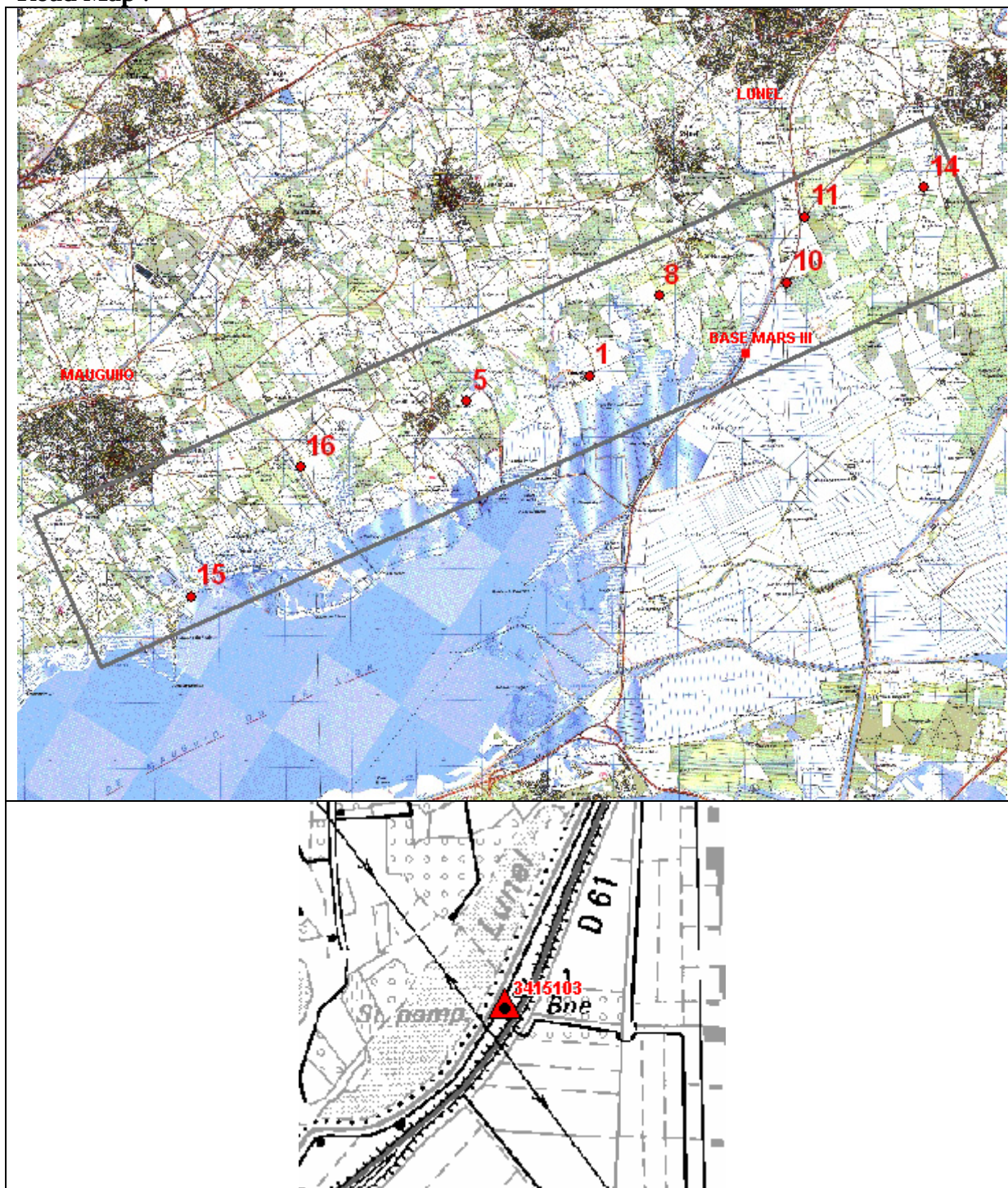
East : 744 620,76

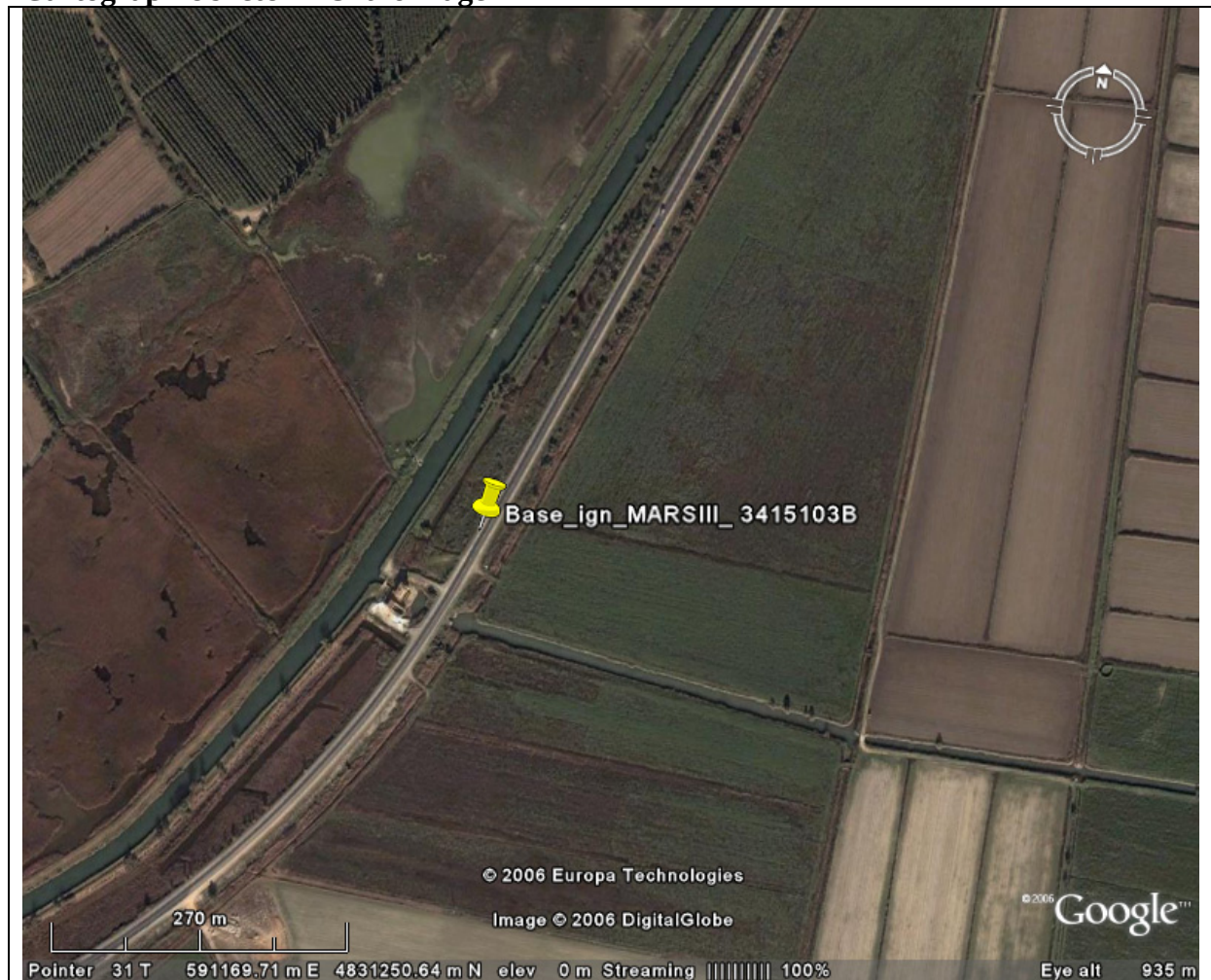
Height : 51,1 (HAE)

Ellipsoidal (WGS84) :

Orthometric :

Road Map :



Cartographic sketch – Orthoimage**Point description**

For technical description look at :

http://geodesie.ign.fr/fiches/fiche_geodesie.asp?num_site=3415103&X=744800&Y=1849000

http://geodesie.ign.fr/fiches/fiche_point.asp?num_site=3415103&no_ptg=02&numero_f50=2843

Photos



Comments

IGN geodetic point in the area has vertical accuracy of 10 cm (it was the only one suitable for such survey), The base tripod was missing the part, which enables horizontal position of the receiver and its position above the geodetic point. Therefore we improvised with a metal plate, which made the base receiver stable. We made the plate horizontal with a classical spirit level (used in construction business) and the old fashioned sounding line to position the receiver above the IGN point. Therefore, the horizontal positions might have a systematic error of 1 or 2 cm due to a strong wind. What concerns us more is the possibility of multipath. The metal plate is a part of a circular saw with a diameter of approximately 30 cm.

National/Regional Map sheet

IGN 1/25000 – 2843 OT – Aigues-Mortes

Operator

ModelTER CNRS/ZRC SAZU (Nuninger L., Zaksek K.)

Date :

21-23th novembre 2006

Nome del cliente : NUNINGER Laure / Chrono-Ecologie UMR6565 CNRS

Project : Aerial laser altimetry data acquisition in littoral plain of Etang de Mauguio, Herault, France

Region : Herault, France

Nome Survey Point : Control Point n° 10

Site Name (village, road nr, etc) : Marsillargues, road D61, parking Demecco

WGS84

Latitude :

Longitude :

UTM 33 (WGS84)

North :

East :

Local coordinate system (geographic) :

Latitude :

Longitude :

Local Coordinate System (projected) : Lambert 3, NTF (post-corrected, Base MARS III – 3415103B)

North : 3150304.185

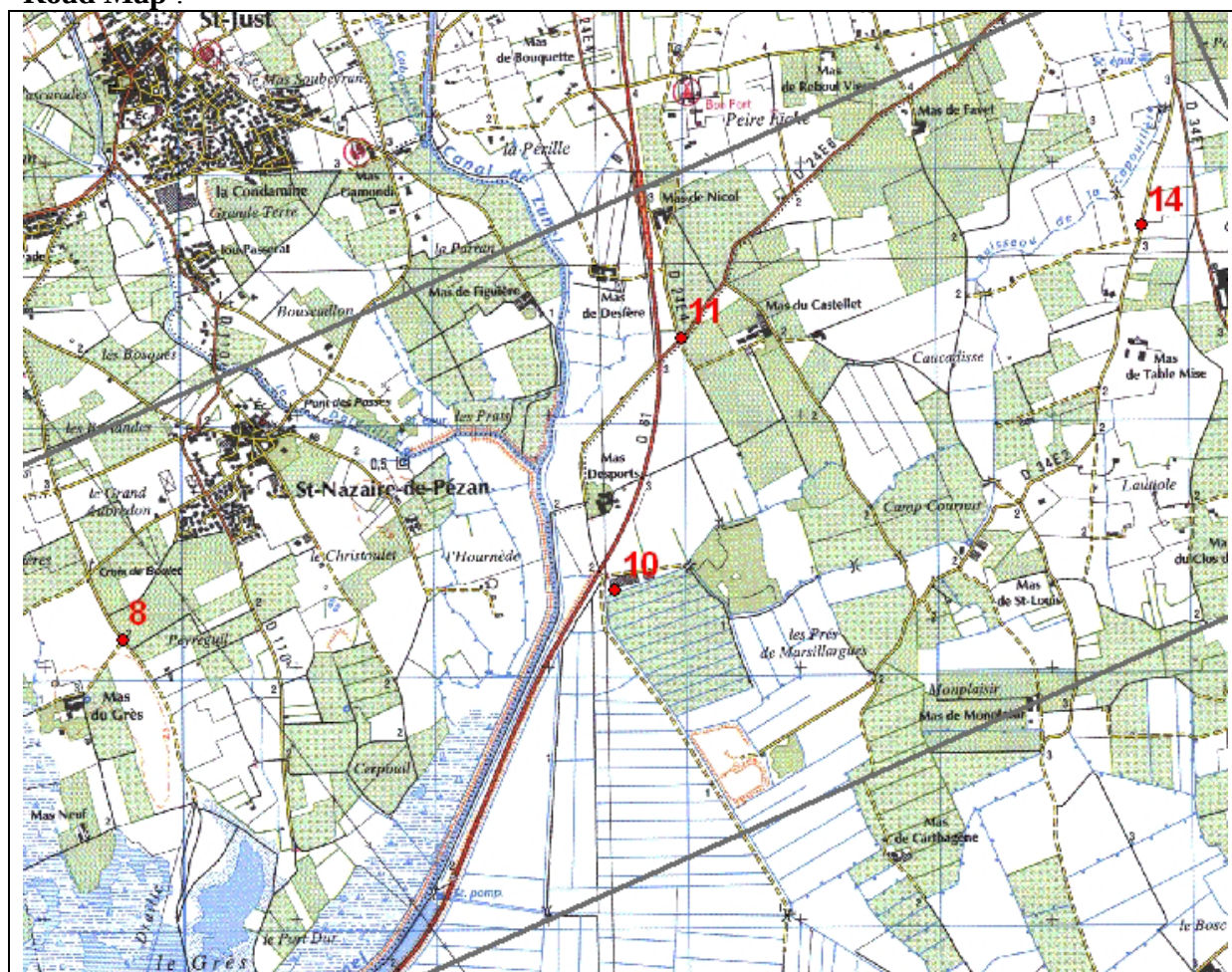
East : 745266.083

Height : 50.602 (HAE)

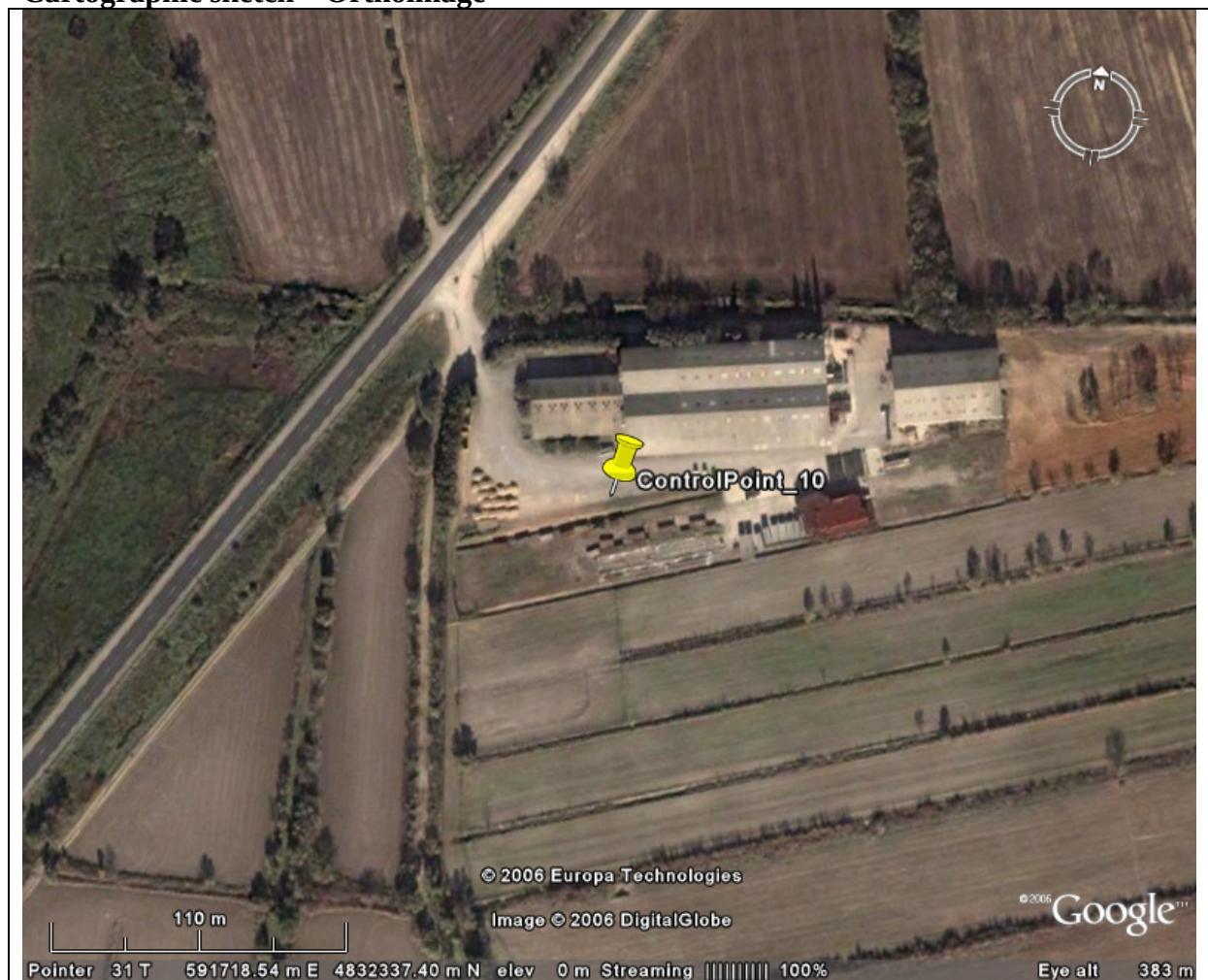
Ellisoidal (WGS84) :

Orthometric :

Road Map :



Cartographic sketch – Orthoimage



Point description

Parking area

Photos



Comments

Horizontal accuracy (cm)	Vertical accuracy (cm)	Nb of positions (1s)	Std Deviation (cm)	Pdop max	NB satellites
3.300	3.400	1,202	0.5	1.8	11

National/Regional Map sheet

IGN 1/25000 – 2843 OT – Aigues-Mortes	
---------------------------------------	--

Operator

ModelTER CNRS/ZRC SAZU (Nuninger L., Zaksek K.)

Date :

21-23th novembre 2006

Nome del cliente : NUNINGER Laure / Chrono-Ecologie UMR6565 CNRS

Project : Aerial laser altimetry data acquisition in littoral plain of Etang de Mauguio, Herault, France

Region : Herault, France

Nome Survey Point : Control Point n°5

Site Name (village, road nr, etc) : Candillargues, stadium

WGS84

Latitude :

Longitude :

UTM 33 (WGS84)

North :

East :

Local coordinate system (geographic) :

Latitude :

Longitude :

Local Coordinate System (projected) : Lambert 3, NTF (post-corrected, Base MARS III – 3415103B)

North : 3148494.745

East : 740369.671

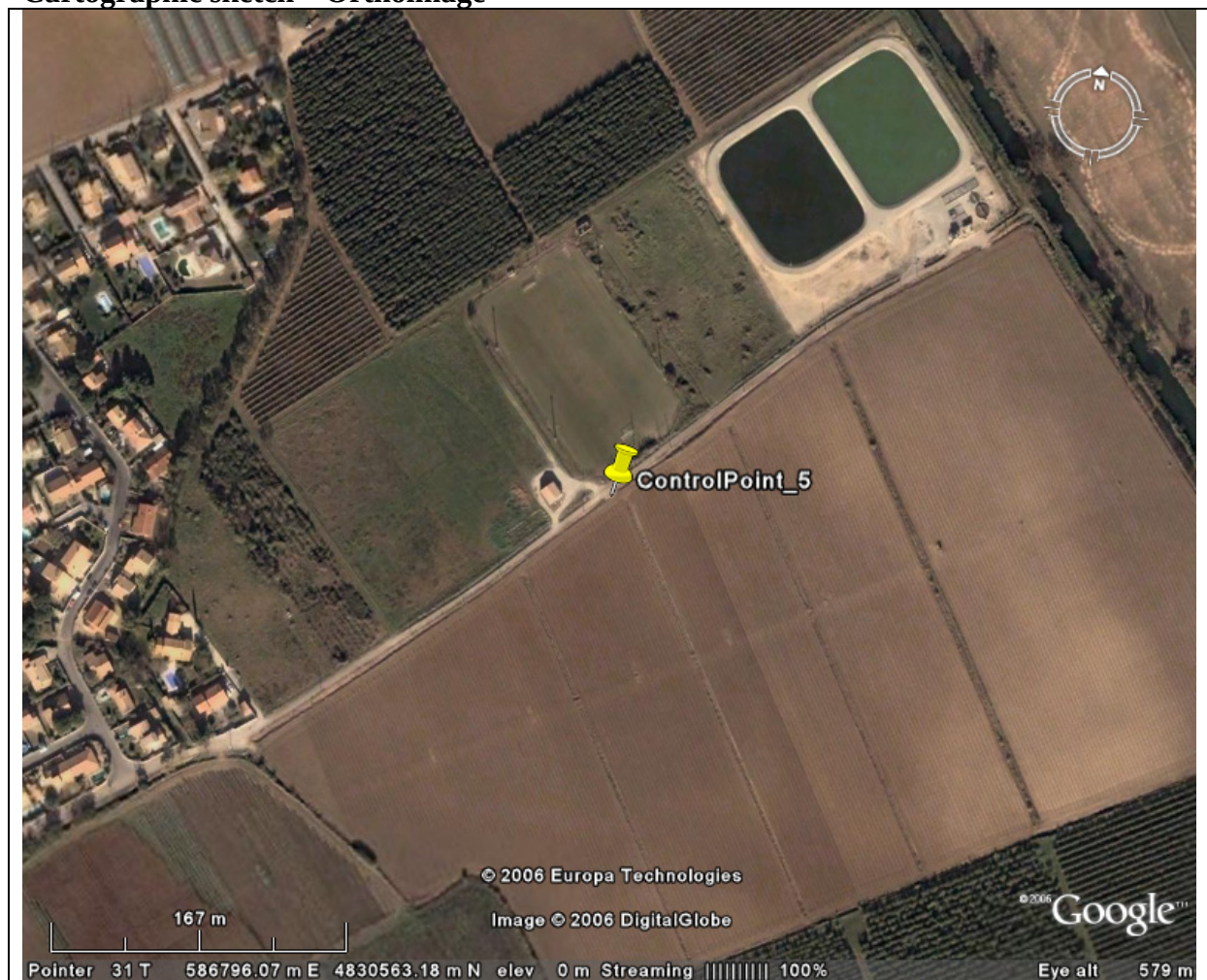
Height : 51.515 (HAE)

Ellisoidal (WGS84) :

Orthometric :

Road Map :



Cartographic sketch – Orthoimage**Point description**

Along the road from village to stadium (at the opposite side of the stadium).

Photos



Comments

Horizontal accuracy (cm)	Vertical accuracy (cm)	Nb of positions (1s)	Std Deviation (cm)	Pdop max	NB satellites
1.000	1.700	2,767	1.1	3	10

National/Regional Map sheet

IGN 1/25000 – 2843 OT – Aigues-Mortes

Operator

ModelTER CNRS/ZRC SAZU (Nuninger L., Zaksek K.)

Date :

21-23th novembre 2006

Nome del cliente : NUNINGER Laure / Chrono-Ecologie UMR6565 CNRS

Project : Aerial laser altimetry data acquisition in littoral plain of Etang de Mauguio, Herault, France

Region : Herault, France

Nome Survey Point : Control Point n°15

Site Name (village, road nr, etc) : Mauguio, between Benteac and Pointe de Salaison

WGS84

Latitude :

Longitude :

UTM 33 (WGS84)

North :

East :

Local coordinate system (geographic) :

Latitude :

Longitude :

Local Coordinate System (projected) : Lambert 3, NTF (post-corrected, Base MARS III – 3415103B)

North : 3145516.790

East : 736158.715

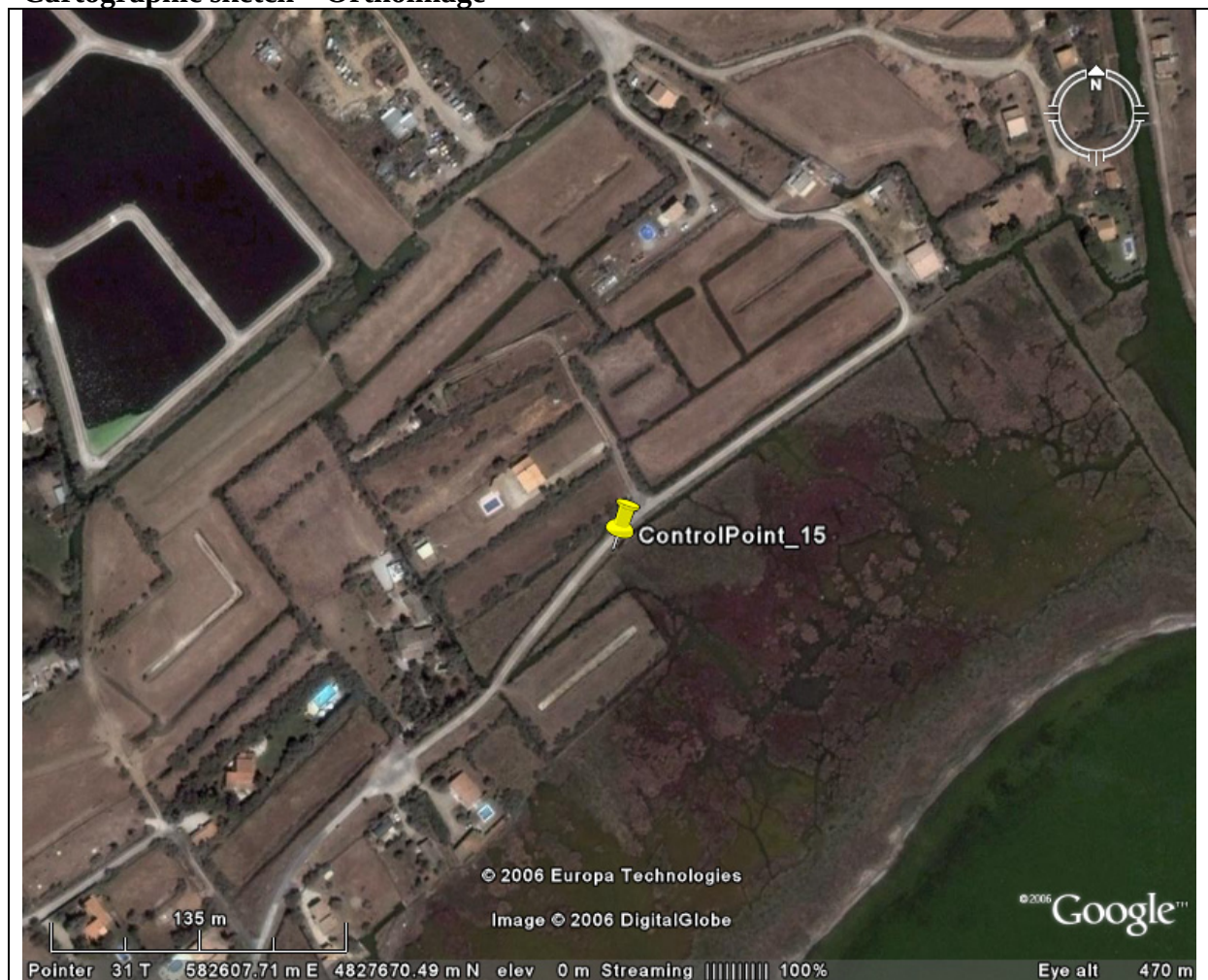
Height : 50.318 (HAE)

Ellipsoidal (WGS84) :

Orthometric :

Road Map :



Cartographic sketch – Orthoimage**Point description**

Along the track (stone and concrete)

Photos



Comments

Horizontal accuracy (cm)	Vertical accuracy (cm)	Nb of positions (1s)	Std Deviation (cm)	Pdop max	NB satellites
1.000	2.300	3,231	0.8	1.7	12

National/Regional Map sheet

IGN 1/25000 – 2843 OT – Aigues-Mortes

Operator

ModelTER CNRS/ZRC SAZU (Nuninger L., Zaksek K.)

Date :

23th novembre 2006

Nome del cliente : NUNINGER Laure / Chrono-Ecologie UMR6565 CNRS

Project : Aerial laser altimetry data acquisition in littoral plain of Etang de Mauguio, Herault, France

Region : Herault, France

Nome Survey Point : Control Point n° 16

Site Name (village, road nr, etc) : Mauguio, Domaine Saint Martin

WGS84

Latitude :

Longitude :

UTM 33 (WGS84)

North :

East :

Local coordinate system (geographic) :

Latitude :

Longitude :

Local Coordinate System (projected) : Lambert 3, NTF (post-corrected, Base MARS III – 3415103B)

North : 3147490.894

East : 737832.367

Height : 51.942 (HAE)

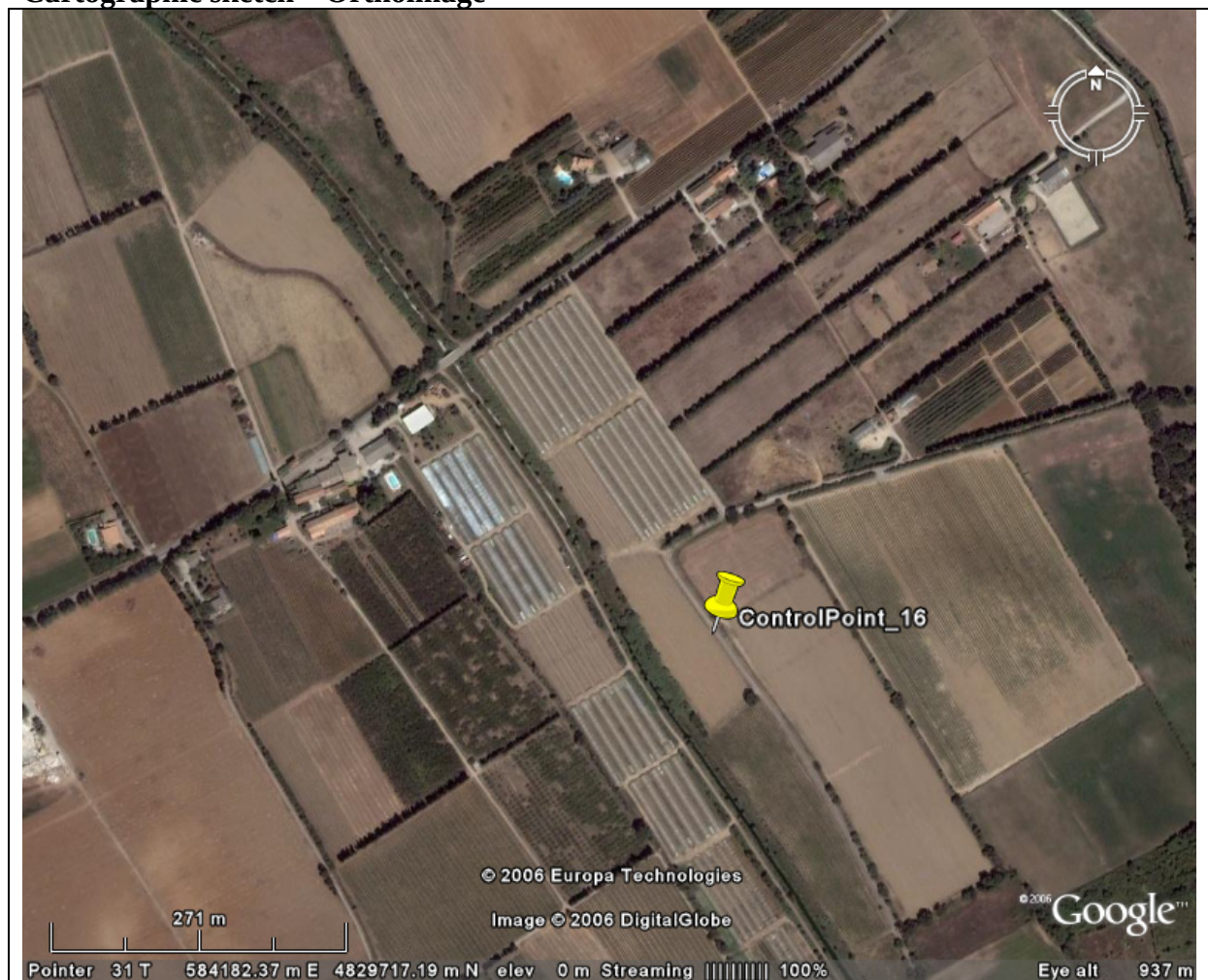
Ellisoidal (WGS84) :

Orthometric :

Road Map :



Cartographic sketch – Orthoimage



Point description

Along the road (bitum and grass)

Photos





Comments

Horizontal accuracy (cm)	Vertical accuracy (cm)	Nb of positions (1s)	Std Deviation (cm)	Pdop max	NB satellites
1.000	1.700	2,812	0.9	2.4	12

National/Regional Map sheet

IGN 1/25000 – 2843 OT – Aigues-Mortes

Operator

ModeLTER CNRS/ZRC SAZU (Nuninger L., Zaksek K.)

Date :

23th novembre 2006

Nome del cliente : NUNINGER Laure / Chrono-Ecologie UMR6565 CNRS

Project : Aerial laser altimetry data acquisition in littoral plain of Etang de Mauguio, Herault, France

Region : Herault, France

Nome Survey Point : Control Point n°1

Site Name (village, road nr, etc) : Lansargues, Mas de Tartuguière

WGS84

Latitude :

Longitude :

UTM 33 (WGS84)

North :

East :

Local coordinate system (geographic) :

Latitude :

Longitude :

Local Coordinate System (projected) : Lambert 3, NTF (post-corrected, Base MARS III – 3415103B)

North : 3148878.474

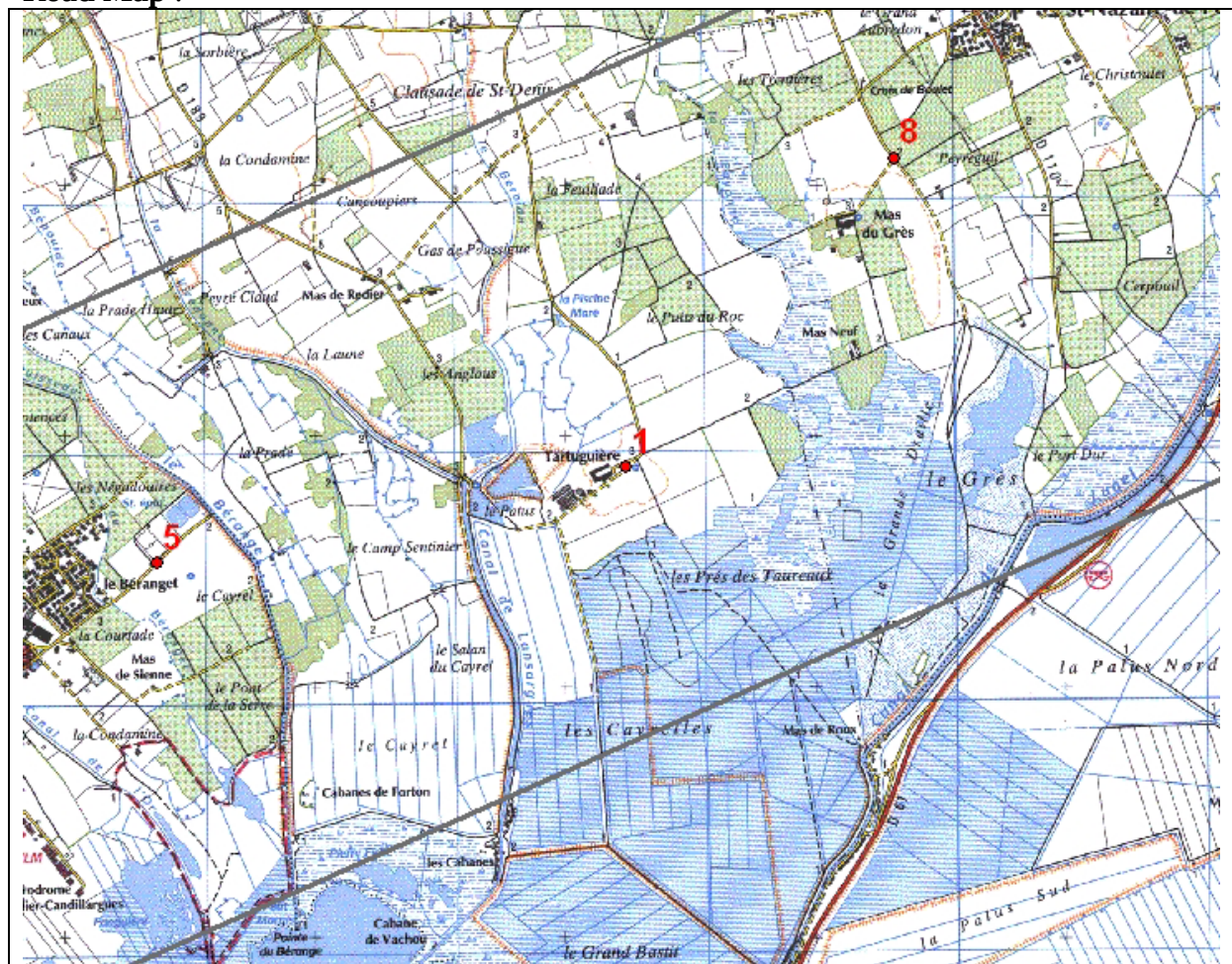
East : 742239.818

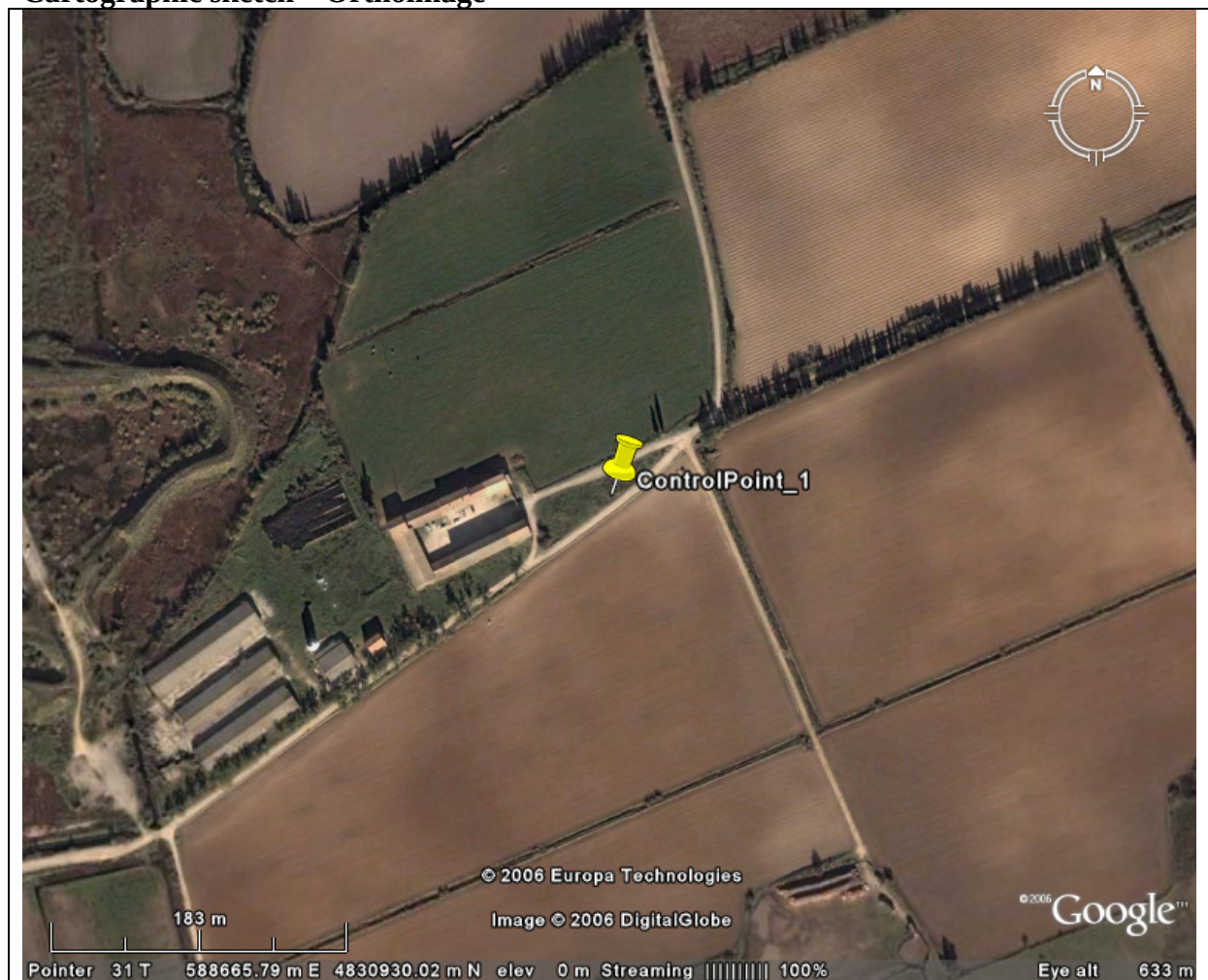
Height : 51.367 (HAE)

Ellisoidal (WGS84) :

Orthometric :

Road Map :



Cartographic sketch – Orthoimage**Point description**

Located on the corner of square place in concrete in the middle of grass

Photos



Comments

Horizontal accuracy (cm)	Vertical accuracy (cm)	Nb of positions (1s)	Std Deviation (cm)	Pdop max	NB satellites
1.000	1.500	2,464	0.5	3.8	7

National/Regional Map sheet

IGN 1/25000 – 2843 OT – Aigues-Mortes

Operator

ModelTER CNRS/ZRC SAZU (Nuninger L., Zaksek K.)

Date :

21-23th novembre 2006

Nome del cliente : NUNINGER Laure / Chrono-Ecologie UMR6565 CNRS

Project : Aerial laser altimetry data acquisition in littoral plain of Etang de Mauguio, Herault, France

Region : Herault, France

Nome Survey Point : Control Point n°8

Site Name (village, road nr, etc) : South west of Saint Nazaire de Pézan

WGS84

Latitude :

Longitude :

UTM 33 (WGS84)

North :

East :

Local coordinate system (geographic) :

Latitude :

Longitude :

Local Coordinate System (projected) : Lambert 3, NTF (post-corrected, Base MARS III – 3415103B)

North : 3150109.745

East : 743311.001

Height : 52.296 (HAE)

Ellisoidal (WGS84) :

Orthometric :

Road Map :



Cartographic sketch – Orthoimage



Point description

Cross Road – track in white stone

Photos





Comments

Horizontal accuracy (cm)	Vertical accuracy (cm)	Nb of positions (1s)	Std Deviation (cm)	Pdop max	NB satellites
4.400	4.500	2,396	0.5	2.7	9

National/Regional Map sheet

IGN 1/25000 – 2843 OT – Aigues-Mortes

Operator

ModeLTER CNRS/ZRC SAZU (Nuninger L., Zaksek K.)

Date :

21-23th novembre 2006

Nome del cliente : NUNINGER Laure / Chrono-Ecologie UMR6565 CNRS

Project : Aerial laser altimetry data acquisition in littoral plain of Etang de Mauguio, Herault, France

Region : Herault, France

Nome Survey Point : Control Point n°11

Site Name (village, road nr, etc) : Marsillargues, road D61

WGS84

Latitude :

Longitude :

UTM 33 (WGS84)

North :

East :

Local coordinate system (geographic) :

Latitude :

Longitude :

Local Coordinate System (projected) : Lambert 3, NTF (post-corrected, Base MARS III – 3415103B)

North : 3151307.327

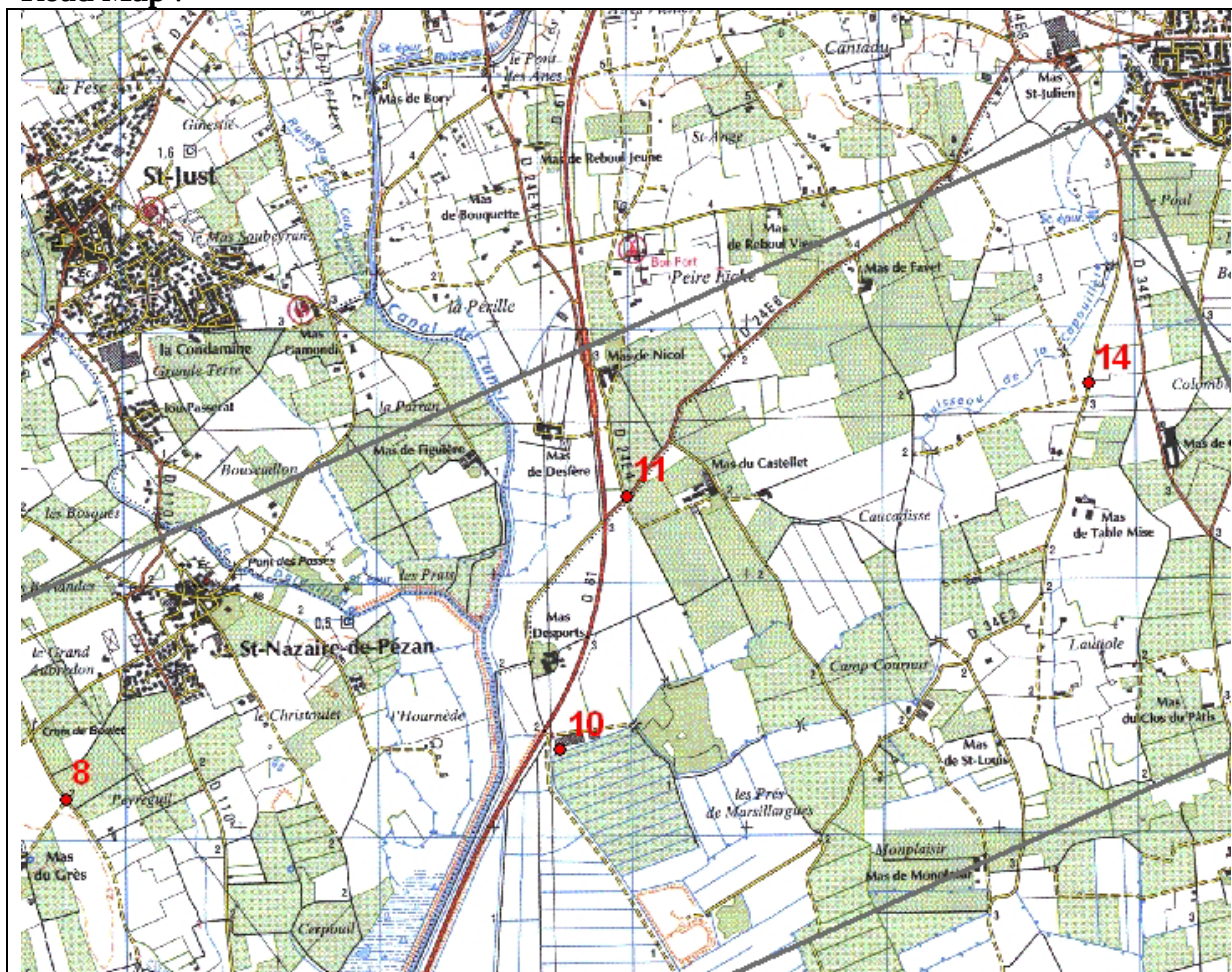
East : 745526.073

Height : 50.648 (HAE)

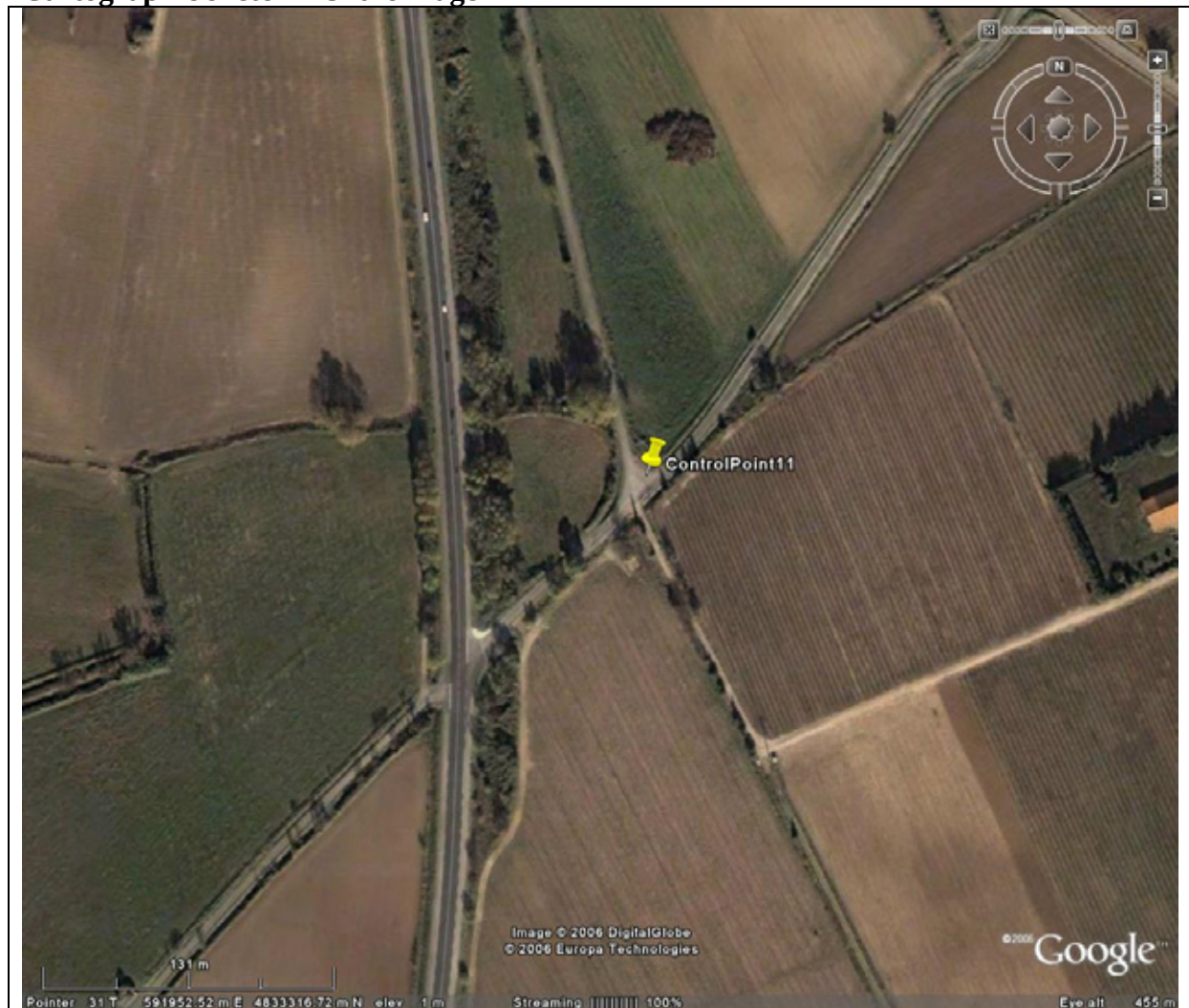
Ellisoidal (WGS84) :

Orthometric :

Road Map :



Cartographic sketch – Orthoimage



Point description

Cross road

Photos





Comments

Horizontal accuracy (cm)	Vertical accuracy (cm)	Nb of positions (1s)	Std Deviation (cm)	Pdop max	NB satellites
4.8	5.2	2,207	0.8	2.2	9

National/Regional Map sheet

IGN 1/25000 – 2843 OT – Aigues-Mortes

Operator

ModeLTER CNRS/ZRC SAZU (Nuninger L., Zaksek K.)

Date :

21-23th novembre 2006

Nome del cliente : NUNINGER Laure / Chrono-Ecologie UMR6565 CNRS

Project : Aerial laser altimetry data acquisition in littoral plain of Etang de Mauguio, Herault, France

Region : Herault, France

Nome Survey Point : Control Point n°14

Site Name (village, road nr, etc) : Marsillargues, road D61

WGS84

Latitude :

Longitude :

UTM 33 (WGS84)

North :

East :

Local coordinate system (geographic) :

Latitude :

Longitude :

Local Coordinate System (projected) : Lambert 3, NTF (post-corrected, Base MARS III – 3415103B)

North : 3151753.984

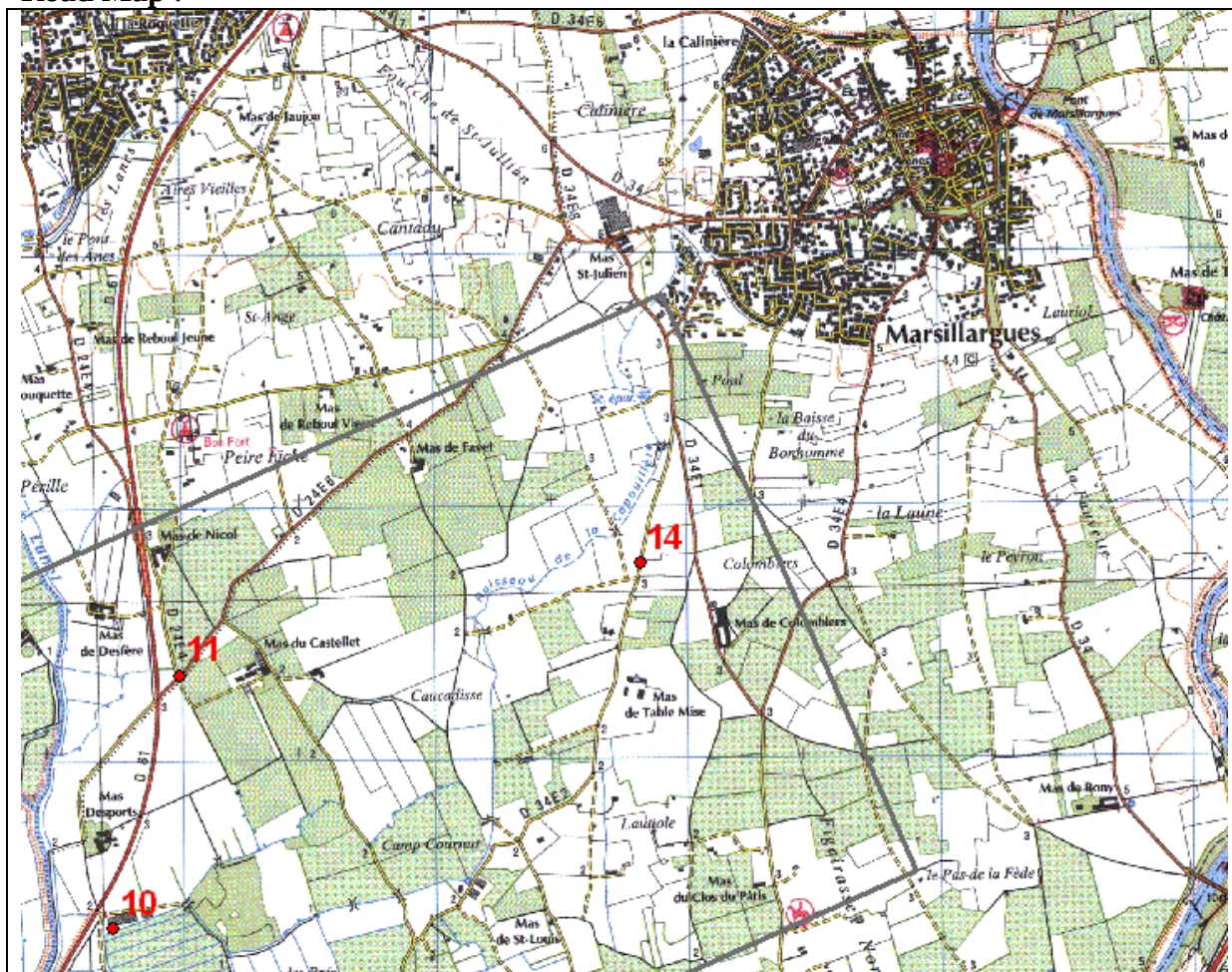
East : 747354.589

Height : 52.258 (HAE)

Ellisoidal (WGS84) :

Orthometric :

Road Map :



Cartographic sketch – Orthoimage



Point description

Entrance of field in between two pillars

Photos





Comments

Horizontal accuracy (cm)	Vertical accuracy (cm)	Nb of positions (1s)	Std Deviation (cm)	Pdop max	NB satellites
5.1	7.7	1,720	0.6	3.3	8

National/Regional Map sheet

IGN 1/25000 – 2843 OT – Aigues-Mortes

Operator

ModeLTER CNRS/ZRC SAZU (Nuninger L., Zaksek K.)

Date :

21-23th novembre 2006

APPENDIX 1

NTF Lambert zone III (France sud)

Datum name : NTF

Datum Method :

Ellipsoïd : Clarke 1880 (IGN)

a Demi-Grand Axe (m) : 6378249.2

b Demi-Petit Axe (m) : 6356515

1/f Aplatissement (1/f) : 293.46602

Excentricité 0.082483256763418

Parameters : to WGS-84

translation X (m) : -168

translation Y (m) : -60

translation Z (m) : 320

Rotation X (secs) : 0

Rotation Y (secs) : 0

Rotation Z (secs) : 0

Scale factor (ppm) : 0

Geoïd Method :

Method : Geoïd Grid Model

Model : RAF98 (France)

Projection :

Lambert Conic conform 1 parallèle

Standard parallel 1 : 43°11'57.449

43.19929138890

Standard parallel 2 : 44°59'45.938"

44.99609388890

Direction of positive coordinates : North and East

Latitude Origin : 44°06'00"N

Central Meridian: 2°20'14.02501"E (East of Greenwich meridian)

0° (Paris Meridian)

Y0 False Northing (m) : 200000

X0 False Easting (m) : 600000

Scale factor : 0.9998775

download the RAF98 grid in ascii format to

<http://www.esgt.cnam.fr/fr/recherche/geoide/raf98.gra>

Annexe 4 – Module de filtrage directionnel développé dans l'environnement ERDAS Imagine (K. Ostir, L. Nuninger 2007, d'après Ph. Jourdain 1995)

Protocole de filtrage (L. Nuninger, D. Charraut 2007, d'après Ph. Jourdain 1995) :

A partir de la thèse de Ph. Jourdain, nous avons décomposé la procédure de calcul développée par l'auteur dans un environnement MatLab. L'objectif du filtre est de mettre en évidence, à partir d'un opérateur dit de Sobel, des bords remarquables du fait d'un changement d'intensité important observé entre deux pixels d'une image. Après avoir appliqué l'opérateur de Sobel dans deux directions pour obtenir des segments perpendiculaire (1 et 2), l'image obtenue, révélant les bords remarquables, sert ensuite de support pour le calcul d'une image secondaire qui est celle des directions (3). Dans cette nouvelle image chaque segment de bord est qualifié par son orientation exprimée en degrés, ce qui permet ensuite d'extraire les segments d'une orientation donnée (Charraut, Favory 1993).

1) Mise en œuvre d'un opérateur de taille 3x3 sur une portion d'image :

Coefficients du filtre

C1	C2	C3
C8	C0	C4
C7	C6	C5

Portion d'image

P1	P2	P3
P8	P0	P4
P7	P6	P5

la valeur P0 correspond à la valeur associée au pixel (i,j) de l'image. En général, cette valeur est une mesure d'un paramètre d'intensité, dont le tableau ordonné des valeurs I(i,j) (lignes, colonnes) constitue l'image.

Résultat de l'application du filtre :

on donne au pixel central de la portion d'image la valeur ;

$$F = (P0.C0) + (P1.F1) + (P2.F2) + \dots + (P8.F8)$$

puis on fait la même chose sur tous les pixels de l'image. On obtient ainsi une nouvelle image, dont les propriétés dépendent des coefficients du filtre utilisé.

Le cas le plus courant est celui du lissage du bruit par moyennage sur la fenêtre ; les coefficients sont alors tous égaux à 1/9.

2) Détection de bords avec 2 opérateurs de gradient de Sobel :

on utilise deux filtres

Filtre 1 pour la direction X

Filtre 2 pour la direction Y

$$W1 = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline -2 & 0 & 2 \\ \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline \end{array}$$

$$W2 = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline -1 & -2 & -1 \\ \hline \end{array}$$

A partir de l'image initiale $I(i,j)$, et en appliquant les deux opérateurs $W1$ et $W2$, on établit l'image des gradients suivant les deux directions X et Y . Il en résulte deux images $Gx(i,j)$ et $Gy(i,j)$ des gradients de l'image suivant les directions X et Y , respectivement.

Les valeurs des intensités de ces deux nouvelles images sont calculées comme indiqué précédemment pour chaque pixel de l'image :

$$Gx(i,j) \text{ \{ou } Gy(i,j)\} = (P0.F0) + (P1.F1) + (P2.F2) + \dots + (P8.F8)$$

où les coefficients $F0, F2, \dots, F8$ sont associés aux deux filtres $W1$ et $W2$.

Le module du gradient $G(i,j)$ de l'image initiale $I(i,j)$, peut être défini par l'expression de la racine carré de la somme des carrés des modules suivant X et Y , soit :

$$G(i,j) = \text{Racine}[Gx(i,j)^2 + Gy(i,j)^2]$$

$G(i,j)$ est une image qui représente les variations absolues des valeurs de l'image entre chaque pixel et ses voisins (dans une fenêtre 3×3). C'est à partir de cette image qu'il est possible de faire un seuillage (passe-haut, passe-bas ou passe-bande) localisant les éléments de l'image associés à une gamme de variations retenues.

3) Détection des directions :

L'image des directions (D) est quand à elle estimée à partir des deux matrices $Gx(i,j)$ et $Gy(i,j)$ par la fonction suivante :

$$D(i,j) = \theta(i,j) + 90^\circ$$

$$\text{où } \theta(i,j) = \arctg(Gy(i,j) / Gx(i,j))$$

Arctg (inverse tangente, fonction « Atan » dans excel – attention le résultat est donné en radians à convertir en degrés)

Attention dans la thèse de Ph. Jourdain les coefficients utilisés pour les filtres de Sobel sont divisés par 2 (cf. p26), en outre pour être ramené à des valeurs comprises entre 0 et 255 (échelles des niveaux de gris – contrainte informatique), les valeurs G sont pondérées par un coefficient et donne une valeur WG comprise entre 0 et 255. Les valeurs des directions, déduites d'un rapport, ne sont pas affectées par cette division et cette renormalisation.

Concrètement la valeur G la plus élevée, détectée sur toute l'image, est ramenée à 255 (soit par exemple une valeur de 339,15 ramenée à 255 par un coefficient de 1,33 (339,15/255)).

Toutes les autres valeurs dans l'image du gradient seront modifiées en utilisant le même coefficient de 1,33.

Script du modèle développé sous ERDAS Imagine (K. Ostir, L. Nuninger 2007) :

Le protocole décrit ci-dessus a été implanté dans le logiciel ERDAS Imagine en utilisant le module de modélisation graphique du logiciel à partir duquel nous avons pu générer le script suivant qui reste à généraliser.

```
COMMENT "Generated from graphical model: c:/program files/leica
geosystems/imagine and lps 9.0/etc/models/edge_detect.gmd";
# CONVOLUTION FUNCTIONS
# OUTPUT RASTER
# Erdas model : ModelTER - Ostir K. - Nuninger L. 2007 ; Source : Jourdain
1995 (Jourdain Ph. - Charraut D. - Favory F.
#
# set cell size for the model
#
SET CELLSIZE MIN;
#
# set window for the model
#
SET WINDOW UNION;
#
# set area of interest for the model
#
SET AOI NONE;
#
# declarations
#
Integer RASTER n16_maugest_dem05f_direct FILE DELETE_IF_EXISTING IGNORE 0
ATHEMATIC 16 BIT SIGNED INTEGER
"e:/laurette/sig/languedocor/lidar/071205_dem_lidar_filtre/maugest_dem05f_d
irect.img";
Float RASTER n22_temp;
Float RASTER n23_temp;
Float RASTER n31_maugest_dem05_l3 FILE OLD NEAREST NEIGHBOR AOI NONE
"e:/laurette/sig/languedocor/lidar/071205_dem_lidar_filtre/maugest_dem05_l3
.img";
Float RASTER n36_maugest_dem05f_edge FILE DELETE_IF_EXISTING USEALL
ATHEMATIC FLOAT SINGLE
"e:/laurette/sig/languedocor/lidar/071205_dem_lidar_filtre/maugest_dem05f_e
dge.img";
FLOAT MATRIX n2_Custom_Float;
FLOAT MATRIX n8_Custom_Float;
FLOAT SCALAR n38_Float;
{
#
# load matrix n2_Custom_Float
#
n2_Custom_Float = MATRIX(3, 3:
    -1, 0, 1,
    -1, 0, 1,
    -1, 0, 1);
#
# normalize matrix n2_Custom_Float
#
if (global sum ($n2_Custom_Float) NE 0)
    {n2_Custom_Float = $n2_Custom_Float / global sum ($n2_Custom_Float);}
```

```
#
# load matrix n8_Custom_Float
#
n8_Custom_Float = MATRIX(3, 3:
    -1, -1, -1,
    0, 0, 0,
    1, 1, 1);
#
# normalize matrix n8_Custom_Float
#
if (global sum ($n8_Custom_Float) NE 0)
    {n8_Custom_Float = $n8_Custom_Float / global sum ($n8_Custom_Float);}
#
# load scalar n38_Float
#
n38_Float = 0.4;
#
# function definitions
#
n22_temp = CONVOLVE ( $n31_maugest_dem05_l3 , $n8_Custom_Float );
n23_temp = CONVOLVE ( $n31_maugest_dem05_l3 , $n2_Custom_Float );
n36_maugest_dem05f_edge = Sqrt ( $n22_temp*$n22_temp+$n23_temp*$n23_temp )
;
#define n40_memory Binary(EITHER 1 IF (
    $n36_maugest_dem05f_edge>=$n38_Float ) OR 0 OTHERWISE )
#define n33_memory Float(ATAN ( $n22_temp / $n23_temp))
#define n35_memory Float($n33_memory * 180 / 3.1415926)
n16_maugest_dem05f_direct = EITHER $n35_memory + 90 IF ( $n40_memory ) OR
-1 OTHERWISE ;
}
QUIT;
```

Table des figures

Figure 1 Acquisition des données Lidar (source : ZRC SAZU)	12
Figure 2 - Exemple de matériel composant une plate-forme Lidar (de gauche à droite): écran de contrôle pour la gestion du système de navigation (CCNS), unité d'enregistrement des données, scanner laser, l'unité de gestion du laser, l'unité de mesure inertielle (IMU), et la plate-forme permettant d'absorber les chocs. L'image montre le système d'acquisition LiteMapper 5600.	13
Figure 3 - Résultat de différentes impulsions laser	14
Figure 4 – Visualisation du nuage de points selon les valeurs d'altitude	20
Figure 5 - Visualisation du nuage de points en profil selon les valeurs d'altitude	20
Figure 6 – Images hyperspectrales en couleur RGB, bande 22, 16 et 9.....	21
Figure 7 - Traitement du nuage de points lidar.	22
Figure 8 - LASEdit 3D view displaying classified point	24
Figure 9 – MNT Lidar avec une résolution de 0.5 m.....	25
Figure 10 – Image d'intensité des points Lidar au sol avec une résolution de 0.5 m (les zones interpolées où les bâtiments ont été supprimés sont clairement visibles – en bas à droite).....	26
Figure 11 – observation du parcellaire sous couvert forestier au lieu dit Bosc Viel au sud de la commune de Mauguio, à l'est de la pointe du Salaison	28
Figure 12 – observations sous couvert forestier d'une anomalie parcellaire située au sud-est de Mas Desport (Marsillargues).....	28
Figure 13 – Relevé CNARBRL et cadastre napoléonien de l'anomalie parcellaire du Mas Desport	29
Figure 14 – Détection d'un ancien chemin au sud-est du Mas de Bouet (Mauguio).....	30
Figure 15 – Profil topographique de l'ancien chemin situé au sud-est du Mas Bouet (Mauguio) : A) Localisation du profil sur le MNT Lidar à 50 cm ; B) Profil topographique.	31
Figure 16 - Détection de limites parcellaires à la Prade (Lansargues), au nord ouest du village de Candillargues.....	32
Figure 17 – Canalisation du Bérange et de la Viredonne au nord-est du village de Candillargues, de la Prade-Haut au nord au Salan du Cayrel au sud.	33
Figure 18 – Détection des paléo cours d'eau du Bérange et de la Bernouide (nord-est du village de Candillargues).....	34
Figure 19 – Hydrologie fossile et parcellaires d'origine antique dans la région de Mauguio (Hérault) d'après une image SPOT (Charraut, Favory 1993, fig. 24b).....	35
Figure 20 – Filtrage directionnel.....	37
Figure 21 – Filtrage directionnel et cadastre <i>Sextantio-Ambrussum</i>	37
Figure 22 – Filtrage directionnel et cadastre <i>Sextantio-Ambrussum</i>	38
Figure 23 – Matrice des filtres de convolution utilisées pour le filtrage du MNT Lidar	39
Figure 24 – Extrait commenté du plan cadastral napoléonien (F. Favory).....	40
Figure 25 – Enclos villageois de Saint Denis (F. Favory, A. Parodi, C. Raynaud) 1- cimetière périphérique, 2- église et cimetière central, 3 et 4 – secteurs d'habitat, 5 - zone d'épandage agraire médiéval, 6 - zones d'épandage agraire antique	40
Figure 26 – Micro-topographie de la Clausade de St-Denis de Genestet (partie sud) et vallée du Berbian	41
Figure 27 – Intensité de la Clausade de St-Denis et vallée du Berbian	41

Table des annexes

<i>Annexe 1 Avis de publicité sur le site PUMA du CNRS (publiée en français et en anglais)</i>	<i>45</i>
<i>Annexe 2 Annexe technique pour l'appel d'offre (fichier Technicalrequirement.doc)</i>	<i>48</i>
<i>Annexe 3 Rapport d'acquisition des données de points de contrôle selon les spécifications techniques de la société Heliogs</i>	<i>50</i>
<i>Annexe 4 – Module de filtrage directionnel développé dans l'environnement ERDAS Imagine (K. Ostir, L. Nuninger 2007, d'après Ph. Jourdain 1995)</i>	<i>89</i>