

# TRAITEMENT DE DONNEES LIDAR AEROPORTE : VERS UNE SOLUTION GLOBALE

Frédéric Bretar <sup>a</sup>, Clément Mallet <sup>a</sup>, David Flamanc <sup>b</sup>, Nicolas David <sup>a</sup>

Institut Géographique National

<sup>a</sup> Laboratoire MATIS

<sup>b</sup> Projet Litto3D

2-4 Avenue Pasteur

94165 Saint Mandé cedex, France

{Frederic.Bretar, Clement.Mallet, David.Flamanc, Nicolas.David}@ign.fr

## Résumé

Le lidar aéroporté est une technique d'acquisition rapide et fiable de la topographie sous la forme d'un nuage de points tridimensionnel. Cette technique, utilisée en mode multi-échos (pour une impulsion laser, plusieurs informations altimétriques sont enregistrées) permet notamment de déterminer la hauteur du terrain en présence de végétation peu dense. Les traitements appliqués au nuage de points lidar sont avant tout une classification que l'on veut la plus automatique possible compte tenu du volume important de données, puis la génération de Modèles Numériques de Terrain (MNT). La gestion automatique de grands chantiers nécessite le développement d'outils spécifiques dotés d'une architecture et d'une mise en œuvre optimale des calculs qui intègrent la totalité de ces post-traitements. Un prototype développé au laboratoire MATIS sera détaillé dans cet article. Nous décrirons également un projet engagé par l'IGN et le SHOM concernant la génération d'un MNT intégré Terre-Mer. Le projet Litto3D© est en effet une première industrialisation des données laser.

**Mots Clés** : Lidar aéroporté, gestion de grands chantiers, MNT, classification.

## Abstract

*Laser Scanning is nowadays a powerful technique for fastly surveying terrestrial landscapes by providing 3D point clouds with extremely high accuracy, regularity and reliability. Since several individual backscattered echoes can be recorded for a unique emitted laser pulse, this technique notably enables to determine terrain altitude underneath low dense vegetation. Lidar data classical processing are, before all, 3D point cloud segmentation and Digital Terrain Model (DTM) generation. Due to the sizeable amount of data, the classification algorithm must be as automatic as possible. The automatic management of large lidar surveys requires the development of specific tools in a specific framework to optimally perform all these post-processings. A software prototype, developed at the MATIS laboratory will be presented in detail in this article. A joint IGN-SHOM project, created to generate a Sea-Land DTM over the French seashore, will finally be presented. The project Litto3D© is the first example of large scale lidar data industrialization.*

**Keywords** : Airborne Lidar Scanning, survey management, processing, DTM, classification.

## 1. Introduction

### 1.1. Contexte général

L'Institut Géographique National (IGN) a pour vocation de décrire la surface du territoire national français et l'occupation de son sol, contribuant ainsi à l'aménagement du territoire, au développement durable, à la protection de l'environnement et à la prévention des risques. C'est dans ce contexte particulier, dont le cadre européen va être établi par une directive européenne pour la gestion des risques d'inondations, qu'une cartographie altimétrique de haute précision devient une donnée majeure pour la réalisation de plans de prévention des risques. En effet, la connaissance précise des bassins hydrographiques et de leurs zones côtières associées, notamment la hauteur du terrain support des écoulements, mais aussi les éléments obstruant le flux de ruissellement comme la végétation ou certains éléments de sur-sol, est un pré-requis à l'élaboration de cartes des zones inondables et de cartes des risques d'inondation. Il

s'agit ici de la cartographie réglementaire des zones à enjeux, qu'ils soient humains, économiques ou environnementaux.

Les données altimétriques issues de la BDAIti® de l'IGN ont une précision hétérogène ( $\sigma=2\text{m}$  sur 70% du territoire) et insuffisante en regard de celle des modèles de prédiction du risque hydrologique. Or la cartographie des zones à enjeux nécessite une précision bien plus importante. Elles sont généralement situées dans un environnement topographique varié composé d'un relief parfois irrégulier, de zones de végétation et surtout de zones urbaines. L'extraction d'une surface terrain à partir de techniques photogrammétriques par corrélation automatique [Pierrot-Deseilligny et al., 2006] peut être mise en défaut d'une part, car le terrain n'est pas visible sous couvert végétal à partir d'une prise de vue aérienne et, d'autre part, car les zones homogènes en radiométrie et peu texturées ne sont pas adaptées à la recherche de points homologues et répondent mal aux critères d'une bonne corrélation.

Depuis quelques années, la technique de la télémétrie laser aéroportée fournit une mesure directe de distance entre un vecteur aérien et la surface terrestre. Le calcul de la trajectographie du vecteur aérien basé sur le couplage d'une unité inertielle et d'un GPS différentiel permet à son tour de transformer ces mesures de distance en points 3D géoréférencés. Notons dès maintenant deux propriétés majeures de ces systèmes : d'abord, la précision altimétrique sur la mesure est particulièrement élevée puisqu'elle est inférieure, sous certaines conditions à 5cm. En outre, l'émission d'un faisceau laser au niveau du vecteur aérien permet l'acquisition d'un ou plusieurs points de mesure le long de l'onde réfléchie. Cette propriété est particulièrement intéressante en milieu forestier ou dans les zones de végétation urbaine, car elle permet d'accéder non seulement à la hauteur de la canopée, mais aussi, sous certaines conditions, à l'altitude du sol sous la végétation.

Dans le cadre de ses missions de service public et pour améliorer la couche altimétrique nationale, l'IGN va s'équiper d'un tel système, en complément de la caméra numérique déjà utilisée à grande échelle pour fournir la couverture orthophotographique nationale.

Les premières zones à enjeux sur lesquelles la technologie lidar sera utilisée à grande échelle sont les littoraux français couvrant une superficie de 16000 km<sup>2</sup>.

C'est suite aux catastrophes de l'Erika et du Prestige que l'Europe a vraiment pris conscience de l'importance du littoral et a recommandé le 30 mai 2002 aux états membres de procéder à un inventaire détaillé du littoral. Le comité interministériel de la mer (CIMER) du 29 avril 2003 a alors prescrit à l'IGN et au SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) de «*s'associer afin d'étudier la manière de produire le référentiel géographique du littoral (RGL)* ». Cette décision a ensuite été confirmée par le premier ministre au Comité Interministériel d'Aménagement du Territoire (CIADT) de septembre 2004. Les deux organismes se sont donc rapprochés afin de modéliser le cœur géographique du futur RGL dans le cadre d'un projet commun baptisé Litto3D©.

## 1.2. Contexte Litto3D

La gestion optimale du littoral est un objectif essentiel à la satisfaction de multiples besoins : protection du littoral (évolution du trait de côte sous l'effet de l'érosion, protection du domaine côtier notamment des parcs naturels marins, ainsi que de la faune et de la flore), prévention des risques (inondations, pollution, catastrophes naturelles), aménagement (portuaire, touristique, industriel), exploitation des ressources vivantes et minérales, recherches et études scientifiques et besoins militaires.

Les données géométriques de base sur le littoral sont insuffisantes pour satisfaire aux besoins applicatifs. Tout d'abord, la bathymétrie SHOM est précise, mais discontinuée dans le temps et l'espace (plus de données aux abords des ports et dans les

chenaux de navigation). Ensuite l'altimétrie IGN est dense mais insuffisamment précise. Enfin, l'estran est très insuffisamment décrit. Les données disponibles ne permettent pas de fournir des modèles continus.

La première phase du projet Litto3D© est de valoriser et diffuser les données existantes. Depuis de nombreuses années, le SHOM et l'IGN entretiennent des bases de données comportant une densité d'informations bien supérieure à celle figurant sur les cartes. À partir de ces informations, une base de données historique, baptisée «*Histolitt* » a été constituée. Le produit «*Trait de côte Histolitt* » qui est un élément important de cette gamme de produits est disponible sur le Géoportail© France depuis juin 2007.

La deuxième phase consiste à construire un modèle altimétrique sur l'ensemble des côtes françaises. Un démonstrateur a été réalisé sur une zone restreinte. L'objectif était d'étudier la faisabilité de la constitution d'une base de données liant de façon cohérente les parties immergées et émergées qui composent le littoral. Le Golfe du Morbihan a été choisi car il concentre, au travers d'une grande variété de reliefs et de thèmes, la plupart des difficultés que le projet Litto3D© aura à résoudre sur l'ensemble du littoral français, en particulier en termes de modélisation hydrodynamique.

Une première mission de laser aéroporté (topographique et bathymétrique) a été effectuée en juin 2005. Des levés hydrographiques (sondeur multi-faisceaux) ont été réalisés en complément. Ces levés ont permis de produire un modèle numérique altimétrique continu entre la terre et la mer, de précision décimétrique et de résolution métrique. Cette expérience menée par le SHOM a permis aux deux instituts d'évaluer la maturité de ces technologies et méthodologie pour constituer le nouveau modèle altimétrique dense et très précis sur le littoral.

Une seconde démonstration sur le littoral de la communauté d'agglomération Toulon Provence Méditerranée, complémentaire de la zone du Golfe du Morbihan, permettra fin 2007 de consolider le processus de production comportant des levés lidar topographiques et bathymétriques.

La généralisation de cette technique à l'ensemble des côtes de France et des départements d'outre-mer permettra de constituer un modèle altimétrique dense et précis. Combinée au modèle de marée du SHOM, cette information constitue la composante géométrique du référentiel géographique du littoral (RGL). Les données seront directement accessibles aux utilisateurs et aux industriels via le portail français de l'information géographique : le Géoportail©.

## 1.3. Problématique

Le laboratoire MATIS<sup>1</sup> de l'IGN travaille particulièrement à l'automatisation des processus cartographiques à partir d'images aériennes et, plus

<sup>1</sup> Méthodes d'Analyse et de Traitement d'Image pour la Stéréorestitution.

récemment, à partir de données lidar. Indépendamment du projet Litto3D©, le groupe de recherche LASER du MATIS a pour vocation de soutenir scientifiquement les futures lignes de production.

L'utilisation de données lidar aéroporté à grande échelle soulève trois problématiques : nous sommes d'abord confrontés à la diversité des paysages et de la topographie. En effet, un des premiers traitements appliqués à des données lidar est la classification (séparation des points sol et sur-sol) que l'on veut la plus automatique et la plus fiable possible. Or, on sait que les performances des algorithmes de classification sont liées au type de paysages sur lesquels ils sont appliqués [Sithole et al., 2003]. On est ensuite confronté au volume important de données, qui soulève le problème de l'architecture d'un système de gestion performant, voire son lien avec des images géoréférencées (aériennes ou satellitaires). Enfin, les traitements peuvent s'avérer particulièrement coûteux en temps de calcul.

L'objectif de cet article est de présenter un cadre technique et scientifique pour aborder ces trois problématiques. La première partie rappelle les principes du lidar aéroporté, ainsi que le mécanisme de géoréférencement des mesures de distance. La seconde partie est une présentation de l'outil développé au laboratoire en vue de gérer des grands chantiers lidar, de son architecture et des algorithmes implémentés. Enfin, les résultats d'une étude pilote concernant le chantier du Golfe du Morbihan dans le cadre du projet Litto3D© seront présentés.

## 2. Rappels sur le lidar aéroporté

### 2.1. Principe

Les systèmes lidar à vocation topographique sont composés, pour la plupart, de laser impulsions à matrice cristalline (Nd:YAG). Chaque impulsion, de forme pseudo-gaussienne, a une durée moyenne de 5ns. La cadence d'émission des impulsions dépend principalement de l'altitude de vol et du mode d'acquisition. Nous ne considérerons dans cet article que des lidar en mode multi-échos.

La propriété de diffraction du laser provoque une dispersion angulaire du faisceau qui dépend à la fois de la longueur d'onde et du diamètre de l'ouverture du laser. Le diamètre de la tâche de diffraction dépend de la hauteur de vol. Lors de sa réflexion sur la surface terrestre, l'onde retour prend une forme complexe qui dépend de la géométrie des objets présents au sein du cône de diffraction ainsi que de la réflectivité des matériaux. Pour une même onde, le photorécepteur détectera un pic d'intensité le long de l'onde retour si celle-ci est supérieure à un certain seuil. Ce sont les « échos » laser. Selon les systèmes, deux à cinq « échos » sont enregistrés par impulsion réfléchie. En pratique, seuls les deux premiers échos sont utilisés, concentrant environ 90% de l'énergie réfléchie totale.

Ces échos sont caractéristiques du paysage survolé. Si le paysage n'est composé que d'une seule couche altimétrique, l'onde réfléchie aura une forme très proche de l'onde émise et un seul écho sera détecté. Ces configurations correspondent à des terrains exempts de végétation ou bien à des constructions humaines de type bâtiment ou réseau routier.

Par contre, si le paysage possède une structure tridimensionnelle significative, l'onde réfléchie aura une forme plus complexe. En fonction de cette distribution tridimensionnelle, le lidar aéroporté en mode multi-échos détectera plusieurs échos pourvu que l'énergie réfléchie soit suffisante. Le premier écho détecté sera donc souvent associé à la couche supérieure de la canopée, le dernier écho associé au sol.

Les lidar aéroportés sont équipés d'un système à balayage transversal (miroir oscillant, polygone rotatif ou fibres optiques) permettant de spatialiser la mesure le long d'une bande de largeur variable en fonction du système et de l'altitude de l'avion. La répartition des points au sol est différente suivant les systèmes. Elle est irrégulière pour tous.

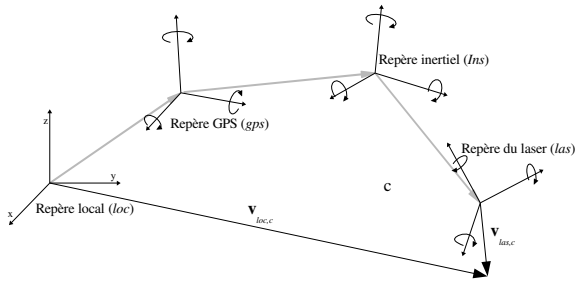
### 2.2. Orientation

Soit le vecteur  $\mathbf{v}_{las,c}$  de norme la distance laser mesurée. Sa direction est fournie dans le repère lié au lidar par les angles d'attitude de l'avion (lacet, tangage et roulis) ajustés à la direction du miroir oscillant ou du polygone rotatif pour les systèmes concernés. Le problème du référencement d'un point laser cible  $\mathbf{c}$  consiste à exprimer le vecteur  $\mathbf{v}_{las,c}$  dans le repère local  $loc$  (Lambert 93 pour la France par exemple). Plusieurs instruments de mesure physiquement disjoints étant impliqués dans la détermination du vecteur  $\mathbf{v}_{las,c}$ , l'expression des coordonnées tridimensionnelles des points d'impacts du faisceau laser dans le repère local fait intervenir différents systèmes de coordonnées (figure 1) associés aux différents instruments et liés successivement entre eux par des isométries.

On exprime le vecteur position  $\mathbf{v}_{loc,c}$  dans le repère local en fonction du vecteur de mesure  $\mathbf{v}_{las,c}$  dans le repère laser par:

$$\mathbf{v}_{loc,c} = \mathbf{t}_{loc,c} + \mathbf{R}_{loc,gps} (\mathbf{t}_{gps,ins} + \mathbf{R}_{gps,ins} (\mathbf{t}_{ins,las} + \mathbf{R}_{ins,las} \mathbf{v}_{las,c}))$$

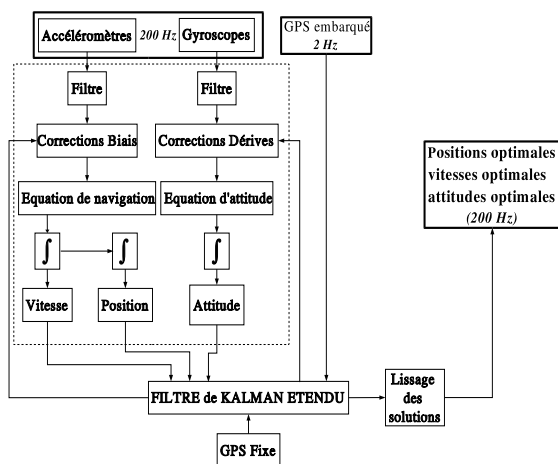
La rotation  $\mathbf{R}_{ins,las}$  et les translations  $\mathbf{t}_{ins,las}$  et  $\mathbf{t}_{gps,ins}$  dépendent des conditions de montages des instruments et sont donc des constantes calibrées (des erreurs de montage et de calibration ne sont pas exclues; ces artefacts se retrouvent dans le nuage de points final).  $\mathbf{t}_{loc,gps}$  est la position de l'antenne GPS dans le repère local. La rotation  $\mathbf{R}_{gps,ins}$  représente l'attitude de l'avion.



**Figure 1** : Expression du vecteur position dans différents systèmes de coordonnées impliqués dans la mesure d'un point laser.

La position de l'avion est mesurée par un système hybride de positionnement inertie/GPS. Un système inertiel (INS) est basé sur l'analyse des mesures effectuées par une unité de mesures inertielles (IMU) composée de trois gyroscopes mesurant les variations d'attitude de l'avion selon les trois axes et de trois accéléromètres. Outre le phénomène de précession gyroscopique propre à tout objet en rotation rapide, les mesures inertielles sont affectées de biais qui dépendent en partie des variations de température au niveau de l'IMU, ainsi que des effets d'hystérésis marqués (comportement d'un bruit blanc gaussien). Ils se traduisent par une dérive temporelle des angles d'attitude et une dérive temporelle quadratique de la position calculée par les gyroscopes.

Un mécanisme de compensation des biais annule partiellement les effets de dérive. Cette correction n'est cependant pas suffisante pour assurer une stabilité du système inertiel à long terme (plusieurs heures). La dérive temporelle résiduelle est une conséquence de l'intégration du bruit blanc gaussien. L'écart type d'une telle distribution à un temps  $t$ , est proportionnel à  $\sqrt{t}$ . C'est pourquoi, sans recalage externe, le bruit blanc provoque une dérive non bornée des erreurs de l'INS.



**Figure 2** : Optimisation de la trajectographie par mesures inertielles et GPS dans un système prédictif de Kalman.

Ces dérives temporelles de basses fréquences sont maîtrisées par des mesures GPS indépendantes par l'intermédiaire d'un filtre prédictif de Kalman étendu. Un filtre de Kalman est un outil statistique qui, à partir

d'une série d'observations, de l'équation d'état du système et d'un modèle de mesure, permet d'estimer de manière optimale les états du système.

Appliqué à la navigation inertielle (les filtres sont paramétrés de manière à estimer de 22 à 35 états), il consiste à estimer la position, la vitesse et les erreurs d'attitude de la solution inertielle ainsi que les biais gyrométriques et accélérométriques. Les paramètres de navigation sont mis à jour en continu à la lumière des prédictions statistiques du filtre. Le schéma de la figure 2 résume les grandes étapes d'optimisation des positions, vitesses et attitudes au moment du levé laser.

Les cadences d'acquisition des données GPS et inertielles sont différentes dans de fortes proportions: 1 à 2Hz pour le GPS contre 200Hz pour l'INS. Les données trajectographiques sont donc acquises à la fréquence de l'inertie. Cette fréquence est bien inférieure à la cadence d'émission et de réception des points laser, ce qui pose le problème du sur-échantillonnage de la trajectographie, et donc des artefacts provoqués par les interpolations. En somme, une grande majorité des points laser seront référencés en se basant sur une trajectographie interpolée et non sur des mesures effectives. Notons que les mesures GPS atteignent une précision de 5 à 30cm si la station fixe utilisée pour le mode différentiel est à une distance inférieure à 50km du chantier [Mostafa et al., 2001].

### 2.3. Précision des mesures

L'identification des erreurs sur la mesure d'un point laser est complexe [Huising et al.,1998]. Diverses expériences ont été menées pour confronter les précisions réelles des systèmes lidar aux précisions nominales fournies par les constructeurs. Elles sont généralement annoncées inférieures à 15cm en altimétrie (cette précision augmente avec l'altitude de vol) et inférieures à 40cm en planimétrie.

Outre les erreurs sur la trajectographie, la précision de la mesure est influencée par de nombreux facteurs.

#### Détection des échos

La qualité de l'altimétrie des échos dépend de la capacité du système à détecter les pics d'intensité correspondant effectivement au maximum local de l'onde réfléchi. Le pouvoir de séparation de deux objets d'altitudes différentes le long du faisceau est donc contingenté par l'électronique du système et par la dynamique du mécanisme de seuillage. Lors de l'utilisation du mode multi-échos, deux cibles heurtées par le même faisceau ne seront discernables sous la forme de deux échos nettement séparés que si elles sont éloignées typiquement d'une distance supérieure à 1,5m. Dans le cas contraire, le point de mesure sera quelque part dans la couche de sur-sol bas.

#### Mécanique du système

Pour les systèmes à miroir oscillant, une erreur sur la mesure de l'angle du miroir (problème de calibration, de synchronisation) [Katzenbeisser, 2003] modifiera l'aspect géométrique de la bande, en introduisant

notamment des décalages notoires en planimétrie et en altimétrie des points situés en bord de bande provoquant soit une courbure transversale de la bande ("smile effect") si les angles sont sur/sous-estimés soit une inclinaison de la bande si une constante vient se glisser dans la mesure des angles. Ces erreurs sont absentes des données acquises à partir d'un système à fibres optiques.

#### *Géométrie locale du terrain*

Un autre phénomène apparaît très nettement en présence de pentes locales importantes, lors de l'étude de paysages montagneux par exemple où elles peuvent atteindre 60°. Wack [Wack, 2005], pour la confection d'un modèle numérique de terrain en zone montagneuse (Alpes) a d'ailleurs observé des décalages entre bandes au niveau des bords de l'ordre de 1,5m. Une erreur de positionnement planimétrique  $\Delta xy$  influence en effet la précision  $\Delta z$  selon  $\Delta z = \Delta xy \tan(i)$  où  $i$  est la pente locale [Hodgson, 2004]. L'angle de scan pour les systèmes concernés doit donc rester faible, de l'ordre de 15° afin de minimiser ces artefacts.

### **3. Les outils de gestion et de traitements**

#### **3.1. Motivations**

Les données laser sortent peu à peu de leur confidentialité et de leur utilisation locale, même si ce mode opératoire reste certainement le plus important. « L'institutionnalisation » du lidar en matière de cartographie de zones à enjeux suscite l'intérêt du MATIS pour le développement d'une architecture performante dédiée aux traitements des données lidar. Les solutions commerciales [Soininen, 1999] ne sont que partiellement modulables et ne conviennent moins bien à un contexte purement dédié à la recherche (performances algorithmiques et de l'architecture), ainsi qu'à un contexte nécessitant une gestion intégrée des données. De manière similaire, des modules spécifiques intégrables dans des Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont disponibles [VLS, 2005] mais souffrent des mêmes inconvénients. D'autre part, certains logiciels de télédétection ou de SIG offrent également des possibilités de traitements de points 3D [Grass, 2006] mais de manière très incomplète et souvent inadaptées pour des d'importants volumes de données : pour un chantier laser de densité moyenne 10 pts/m<sup>2</sup> couvrant une surface de 15 km<sup>2</sup>, le volume de données représente au format ASCII environ 10 Gigaoctets et ne peut être géré par de tels logiciels.

Le laboratoire MATIS mène depuis quelques années des recherches sur le laser aéroporté. Compte tenu de l'hétérogénéité des formats et des informations contenues dans les données disponibles et de leur volume, nous nous sommes intéressés au moyen de les gérer de manière optimale pour optimiser les processus les plus coûteux en mémoire et en temps. La volonté est de pouvoir d'une part gérer, manipuler ou visualiser des chantiers laser dans leur globalité et,

d'autre part, sélectionner et traiter ces données à différentes échelles.

La plate-forme **iSYSTEM**<sup>1</sup> a donc été développée à ces fins. Elle permet l'intégration, la gestion, la manipulation et le traitement d'importants volumes de données lidar hétérogènes, sous forme de nuage de points.

Son intérêt est triple puisque cette plate-forme permet de capitaliser les algorithmes développés au laboratoire mais également de fournir un outil de traitement et d'expertise de données laser aéroporté pour mener des études au sein de l'IGN (cf. partie 4). Cette plate-forme a enfin pour vocation de tester la faisabilité de l'industrialisation de certains algorithmes implémentés.

Le contexte de développement et d'utilisation d'un outil modulaire entre dans la même logique que celle menée par plusieurs autres organismes: certains ont concentré leurs travaux sur l'amélioration des performances de visualisation 3D des données laser [Weinacher et al., 2004] alors que d'autres ont proposé des solutions plus complètes avec une gestion des ressources disponibles par chantier laser, des processus qualité sur les données et les traitements ainsi que des outils avancés de chargement et de sauvegarde de données sous différents formats [Hug et al., 2004, Luethy et al., 2005].

#### **3.2. Plate-forme iSYSTEM**

##### *3.2.1. Architecture*

Au sein de la plate-forme iSYSTEM, les données laser sont hiérarchisées sur trois niveaux:

Chantiers laser: les données laser sont tout d'abord rassemblées par chantier c'est-à-dire par zone géographique commune. Un chantier regroupe également les ressources photogrammétriques existantes sur cette zone (orthophotographies, Modèles Numériques de Surface -MNS- et de Terrain -MNT-, Scan25® IGN) communes à toutes les missions menées sur la zone.

Missions disponibles: chaque chantier est ensuite découpé en autant de répertoires qu'il y a eu de missions lidar volées sur la zone. Une mission correspond à un chantier pour une période donnée. Chaque mission comprend les données laser brutes (si elles ont été fournies, sinon sous leur forme initiales), prétraitées (i.e. sans les attributs inutiles) et converties au format interne de iSYSTEM. De plus, elle est accompagnée d'un fichier de métadonnées (format XML) contenant les principales informations sur la mission: emprise géographique, nombre de points laser, densité, capteur utilisé et ses métadonnées, dénomination des bandes laser associées à la mission, recouvrement moyen entre bandes... L'objectif est double: avoir instantanément à disposition ces informations fondamentales et pouvoir cataloguer

---

<sup>1</sup> SYStème de gesTion de donnÉEs laseR.

ultérieurement toutes les bandes laser d'une mission et toutes les missions d'un chantier.

**Bandes laser disponibles:** chaque fichier de points laser brut est converti au format de données laser interne à la plate-forme iSYSTEM, tout en conservant la géométrie d'acquisition des données (bandes) quand elle nous a été fournie.

Ce format unique, binaire, a été spécifié pour homogénéiser les formats bruts à disposition. Un point laser, quelque soit la mission, le capteur ou la géométrie d'acquisition possède six attributs : trois obligatoires (le triplet de position) et trois facultatifs, renseignés s'ils existent : l'intensité du retour, le numéro de l'écho et sa classe (sol, bâtiment, végétation haute, bruit, mer...). Une « bande laser » au sens de la plate-forme iSYSTEM comprend donc :

- autant de fichiers que d'attributs disponibles (un attribut = un fichier, il y en a donc potentiellement six). Le but est ainsi d'améliorer de stockage des points, en ne conservant pas les attributs non renseignés et en facilitant l'ajout futur de nouveaux attributs sans contrarier l'organisation actuelle. Ces fichiers sont au format binaire pour un gain en taille et une plus grande rapidité d'accès. On a observé un gain de taille significatif (facteur 3) entre un fichier brut ASCII et un fichier converti dans iSYSTEM.
- un fichier de métadonnées, au format XML: nombre de points, enveloppe convexe, trajectographie approchée, attributs existants...

### 3.2.2. Traitements et fonctionnalités

La plate-forme iSYSTEM offre un certain nombre de fonctionnalités et de traitements pour les données laser. Elle gère tout d'abord l'import de données brutes aux formats simples (.xyz, .xyzl) en les convertissant au format interne ainsi que l'export aux formats ASCII et LAS (format binaire non propriétaire défini comme un standard). Les requêtes topologiques menées sur les nuages de points laser sont effectuées sur la base d'un quadtree. Un quadtree est un pavage de l'espace 2D par un ensemble de carrés de tailles différentes. Cette structure permet de gérer notamment les ensembles de points répartis de manière irrégulière.

De plus, une interface 2D et 3D permet d'afficher un ensemble de bandes ou de chantiers. L'affichage peut se faire en fonction des informations disponibles sur le chantier sélectionné à l'ouverture de la plate-forme: classification, intensité de retour ou numéro de l'écho.

Des manipulations simples sont également disponibles tels que le découpage par dalles de chantiers intégraux. Le but est de pouvoir exporter les données pour des traitements futurs non plus sous forme de bandes mais sous forme régulière pour profiter du recouvrement entre bandes laser. La sélection interactive de zones d'intérêts via l'interface 2D a été implémentée à des fins d'analyse locale de nuages de points (vérifications de certains traitements)

ainsi que pour effectuer des traitements à des échelles plus réduites. De plus, l'utilisateur de la plate-forme peut saisir des profils altimétriques couplés ou non à des MNS ou des MNT pour vérifier la cohérence entre bandes laser ou pour valider la création de MNS/MNT laser en le comparant à des MNS/MNT photogrammétriques.

Les traitements génériques à disposition avec l'outil iSYSTEM sont la classification de nuages de points, la génération de MNS et de MNT. Les algorithmes sont décrits en détail dans la partie 3.3. Enfin, la mise à jour et la création de métadonnées de chantiers peuvent être gérées de manière interactive pour une plus grande flexibilité.

iSYSTEM a été développée en langage de programmation C++. Elle est fondée sur une librairie de gestion de données laser, elle-même basée sur une librairie multi-plateforme développée au laboratoire MATIS (en C++ également), utilisant en particulier l'interface image/vecteur 2D (librairie *open source* wxWidgets) et le module de visualisation 3D de données vecteurs (librairie wx/OpenGL, *open source* également).

## 3.3 Les algorithmes

### 3.3.1. Génération de Modèles Numériques de Surface

Les MNS ont été calculés en utilisant un opérateur de rang. Soit un voisinage de points laser ordonnés selon leur altitude par ordre croissant, l'application d'un opérateur de rang  $r$  (exprimé en pourcentage) renvoie l'altitude du  $r^{\text{ème}}$  points laser appartenant au voisinage ordonné. À partir des points laser  $p'$  contenus dans un voisinage  $V_p$  de centre  $p$  et rangés par ordre croissant d'altitude, on définit l'opérateur de rang  $\mathcal{R}$  qui retourne l'altitude  $z'_r$  de l'élément  $r$  par

$$\mathcal{R} : \mathbb{R}^3 \times V_p \times \mathbb{N} \longrightarrow \mathbb{R}$$
$$p, p', r \longmapsto z'_r$$

Le calcul est effectué en parcourant une image géoréférencée, chaque pixel étant successivement le centre d'un voisinage. Ce voisinage peut être de forme circulaire ou rectangulaire. La résolution du MNS et le taille du voisinage dépendent de la densité de points. Plus le voisinage sera étendu, plus le MNS final aura un aspect lisse, tandis que l'utilisation d'un voisinage de faible dimension risque de ne pas contenir de point laser.

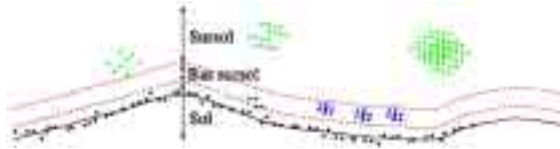
La présence de points faux d'altitude élevée nous contraint, en général, à utiliser un rang  $r=90\%$  à la place du maximum local.

### 3.3.2 Classification automatique

La classification automatique d'un nuage de points laser est un traitement fondamental pour extraire le MNT correspondant. Il existe de nombreuses

approches [Sithole et al, 2005], mais peu d'entre elles sont implémentées au sein de logiciels commerciaux.

Nous avons utilisé un algorithme développé dans [Bretar, 2006] que nous rappelons brièvement. La sémantique utilisée est composée de trois classes : le sol, le sursol et le bas sursol, cette dernière classe étant introduite dans un second temps.



**Figure 3** : Stratification de la classification (vert=sursol, bleu=bas-sursol et noir=sol).

À partir du point d'altitude minimale appartenant au sol, une fenêtre carrée de dimension  $d_s$  se propage au sein du nuage de points en suivant la frontière d'une zone définissant les plus grandes pentes. Pour un pas de propagation constant (la résolution du MNT),  $d_s$  est choisi de manière à assurer un pourcentage de recouvrement entre deux fenêtres successives d'au moins 50%. Pour chaque site  $s$  de cette zone, l'altitude du sol est estimée à partir des points laser appartenant à cette fenêtre (moyenne des points les plus bas du voisinage). L'algorithme est ensuite basé sur la comparaison locale des altitudes des points laser au MNT. Ce MNT est calculé de manière séquentielle comme la moyenne des altitudes des points laser classés sol. Grâce au fort recouvrement entre fenêtres successives, un point laser sera donc classé itérativement sol ou sursol. Cette surface MNT est calculée pour prendre en compte non seulement les influences locales des points laser, mais aussi son environnement global.

L'approche développée est basée sur un filtrage de type morphologique. Or, la taille  $d_s$  de l'élément structurant est souvent un facteur limitant : la classification des éléments de sursol d'extension spatiale supérieure à  $d_s$  est fautive en présence de grands bâtiments par exemple, mais aussi en présence de végétation où le dernier écho laser n'appartient pas de manière certaine au sol. Dans ce cas précis, il s'agit de borner et de moduler  $d_s$  en fonction de l'extension de la végétation. Sur les zones de pente constante,  $d_s$  doit être faible afin de garder les micro-reliefs. Par contre,  $d_s$  doit augmenter tant que la fenêtre ne contient pas suffisamment de points appartenant réellement au sol. Nous présentons dans [Bretar et Chehata, 2007] une méthode pour gérer cette fenêtre évolutive, notamment en fusionnant les données lidar et des images RGB. Un des enjeux est de détecter la végétation haute et dense d'une zone rurale. Une image NDVI hybride est donc générée en remplaçant la composante IR image par l'intensité lidar. Un masque de végétation haute est ensuite calculé en croisant le NDVI hybride avec un masque  $\sigma^2$  de variance sur les points laser.

On définit ce masque par l'ensemble des sites  $s$  vérifiant :

$$\{s / NDVI(s) \in [0.05, 0.66] \cap \sigma^2(s) \geq 1m\}$$



**Figure 4** : Ortho-image RGB sur la région de Vannes.

Ce masque de végétation haute est ensuite utilisé pour définir localement le pourcentage  $x_s$  de végétation contenu dans la fenêtre de classification de taille minimale. Les variations de  $d_s$  ne sont pas linéaires : l'élément structurant doit grandir fortement quand le ratio de végétation est élevé puisque la probabilité que des points laser atteignent le sol diminue en présence de végétation. Dans le cas où le ratio est faible, on peut considérer que les points d'altitude minimale appartiennent réellement au sol.  $d_s$  est donc défini comme une fonction exponentielle de  $x_s$ . La Figure 5 montre un MNT calculé avec une valeur constante  $d_s=10m$ , sans prendre en compte le masque de végétation haute. Les reliefs caractéristiques sont visibles, c'est le cas de certaines routes, mais une partie de la végétation est incluse dans la surface sol. La figure 6 illustre les améliorations de notre méthode sur la qualité du MNT. Pour la zone considérée,  $d_s$  varie entre 5m et 130m, les plus fortes valeurs étant concentrées sur les zones de végétation. On observe que la surface est beaucoup plus régulière que les artefacts provoqués par la présence de végétation haute sont supprimés. L'étape de régularisation permet de faire ressortir les micro-reliefs.



**Figure 5** : Masque de végétation haute projeté sur l'ortho-image végétalisée figure 4.



**Figure 6** : MNT correspondant à la figure 4 calculé avec  $d_s=10m$ .

### 3.3.3. Génération de Modèles Numériques de Terrain haute résolution

La surface terrain calculée à partir de l'algorithme de classification automatique est une généralisation de la topographie ne représentant que les basses fréquences du terrain.

Or, les points classés sol décrivent également les micro-reliefs du terrain. Au-delà d'un simple ré-échantillonnage du MNT précédent, nous considérons une approche par régularisation markovienne développée au MATIS [Bretar, 2007]. C'est une approche itérative basée sur la minimisation d'une énergie associée à la nappe terrain. Elle est constituée d'une énergie d'attache aux données (la distance euclidienne entre la nappe terrain et les points laser) et d'une énergie de régularisation définie par :

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_r &= \alpha_1 \text{tr}(H)^2 - \alpha_2 \det(H) \quad \alpha_1, \alpha_2 \in \mathbb{R}^+ \\ &= \frac{\alpha_2}{2} \left( \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right)^2 + \left( \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right)^2 \right) + \alpha_2 \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x \partial y} \right)^2 \\ &\quad + \left( \alpha_1 - \frac{\alpha_2}{2} \right) \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right)^2 \end{aligned}$$

où  $h$  est la nappe terrain,  $H$  est la matrice Hessienne,  $\alpha_1 \geq 0$  et  $\alpha_2 \geq 2\alpha_1$  sont deux constantes. Le problème de minimisation est résolu par un algorithme de descente de gradient (énergie convexe).



**Figure 7** : MNT avec voisinage adaptatif.

### 3.4. Calcul partagé

L'utilisation de la plate-forme iSYSTEM sur un ordinateur personnel est possible pour la plupart des traitements proposés. Cependant, la classification de nuages de points ou la génération de MNT sur l'intégralité d'un chantier laser nécessite une autre organisation. À titre d'exemple, un chantier laser composé de 141 bandes correspondant à  $325 \cdot 10^6$  points (soit  $\sim 2$  Gigaoctets) sur plus de 320 km<sup>2</sup> doit tout d'abord être découpé en une centaine de dalles de taille proportionnelle au volume de RAM de l'ordinateur avant d'appliquer indépendamment le même traitement sur toutes ces dalles, ce qui s'avère rapidement coûteux en temps de calcul.





**Figure 8** : Projection des points laser (données SHOM) classés (rouge=sursol, jaune=sol, bleu=bas sursol) sur une ortho-image.

Le MATIS utilise le logiciel Condor® qui génère un environnement à haut-débit de calcul ou HTC (*High Throughput Computing*) [Condor, 2007]. Un environnement HTC cherche à fournir efficacement à tout instant la plus grande capacité de traitement disponible sur de longues périodes de temps en exploitant les périodes d'inactivités de machines disponibles sur son réseau d'interconnexion tout en protégeant les droits et les besoins des utilisateurs [Basney et Livny, 1999]. Il s'agit donc d'un système de mutualisation des puissances de calculs inutilisées.

Une telle stratégie de calcul est à opposer aux supercalculateurs. En effet, un supercalculateur est généralement conçu pour des besoins applicatifs spécifiques et surtout gourmands en puissance de calcul. L'approche est alors de type *High Performance Computing (HPC)* c'est-à-dire que l'on cherche à obtenir une importante puissance de calcul sur une durée de temps limitée et non sur une longue période de temps.

Condor® est une solution possédant de nombreux avantages et qualités [Thain et al., 2005]:

- il utilise un parc hétérogène de machines (en processeurs, en systèmes d'exploitation, en puissance).
- il permet la soumission de plusieurs tâches simultanément, Condor® choisit ensuite quand et où lancer ces tâches, selon des critères de priorité. Il surveille la progression des tâches et finalement informe l'utilisateur de la fin de la tâche lancée.
- des points de contrôle (*checkpoints*) sont créés au fur et à mesure de l'avancement des

tâches pour gérer leurs interruptions éventuelles : Condor® peut être configuré pour lancer des tâches sur les stations de travail quand l'unité centrale de calcul (CPU), la souris et le clavier sont inactifs. Si une tâche est lancée sur une machine quand son utilisateur la réactive, Condor® fait migrer la tâche vers une autre machine et la reprend là où le processus s'est arrêté.

#### 4. Une application : le Golfe du Morbihan

Les résultats que nous présentons dans cette partie sont issus d'une étude commandée par le projet Litto3D© [Bretar et al, 2007]. Les données utilisées ont été acquises par le SHOM et l'IFREMER sur le Golfe du Morbihan. Dans cette étude, il s'agissait essentiellement de qualifier des algorithmes de traitements automatiques de données lidar développés au MATIS sur l'ensemble de la zone : calculer une classification des nuages de points, générer un MNS global ainsi qu'un MNT à une résolution de 1m.

##### Données SHOM

- Acquisition en juin 2005,
- 80 millions de points composés du premier et dernier écho,
- Données par bandes recomposées en 80 dalles de 1,5x1,5km<sup>2</sup> pour les traitements,
- Système lidar SHOALS 1000T,
- Densité des points : de 0,35 pt/m<sup>2</sup> à 1,2 pt/m<sup>2</sup>.

##### Données IFREMER

- Acquisition en mai et juin 2004,
- 230 millions de points composés du premier et dernier écho,
- 184 dalles de 2,02x2,02 km<sup>2</sup> avec 20 m de recouvrement latéral et longitudinal,
- Système lidar ALTM (Optech),
- Densité moyenne des points : 0,7 pt/m<sup>2</sup>.

Sur les données IFREMER, il apparaît localement des points situés nettement sous la surface sol qui ne peuvent être attribués à quelques éléments morphologiques. L'origine de ce bruit négatif n'est pas déterminée avec exactitude.

Les traitements ont été réalisés en utilisant la plateforme iSYSTEM. Nous présentons maintenant quelques commentaires sur les résultats de la classification automatique.

Les paysages spécifiques du Golfe du Morbihan (présence d'îles et de plans d'eau dans certaines dalles) nécessitent l'adaptation des algorithmes originaux. En partant de l'hypothèse que la densité de points est moindre sur les plans d'eau, nous avons introduit un masque de densité pour focaliser les calculs des altitudes sur les zones d'intérêt.

L'algorithme de classification automatique est appliqué **en initialisant la graine sur chaque région connexe** délimitée par le masque de densité.

Le calcul d'un masque de densité est effectué par opérations morphologiques successives sur l'image de densité des chantiers. Un algorithme de labellisation est ensuite appliqué pour extraire les régions connexes correspondant au littoral.

#### Les îles

En ce qui concerne les données IFREMER, la présence de nombreux points sur la surface du plan d'eau aux alentours des îles rend leur classification moins robuste, notamment en présence de végétation. Nous avons constaté que l'eau était classée sol sur le pourtour des îles, le rivage, bas sursol, et le reste (points de l'île appartenant réellement au terrain et à la végétation), sursol.

D'un point de vue global, ces configurations sont minoritaires, mais non moins importantes dans le cadre du projet Litto3D© et doivent faire l'objet d'un traitement particulier.

Le filtrage morphologique proposé pour calculer le masque de densité permet de résoudre en partie ces problèmes<sup>1</sup> et de se focaliser sur les îles pourvu que la densité de points y soit suffisante. Cette solution dépend de seuils fixés a priori et donc des données en entrée.

#### Les grandes zones de sursol

En présence de végétation trop dense, le dernier écho laser n'atteint pas le terrain. Bien que le prédicteur de végétation soit pertinent sur la plupart des zones de forêt, l'algorithme de classification intègrera parfois les points appartenant à la première couche altimétrique de sursol à la surface terrain. Le problème se pose aussi en présence de bâtiments dont la superficie est très supérieure à la taille de l'élément morphologique. La surface terrain va peu à peu se rapprocher des points décrivant le toit du bâtiment. Nous n'avons pas encore intégré de détecteur de zone urbaine dans la suite algorithmique. La solution envisagée consiste donc à utiliser une base de données topographique, ce qui sera prochainement opérationnelle.

#### Le bruit négatif

La présence de points laser situés sous la surface terrain réelle engendre, selon les règles de l'algorithme de classification automatique, une sous-estimation de l'altitude du terrain. En fonction de l'amplitude altimétrique de ces points sous-sol, les points supérieurs sont affectés soit à la classe bas-sursol, soit à la classe sursol.

Un préfiltrage développé au MATIS permet de s'affranchir en partie de ces points, mais ne les élimine par totalement (points situés à moins de 1 m de la

surface sol). Pour les données étudiées, ces points sont généralement situés sur des zones planes (contrôle a posteriori). L'utilisation de l'orthoimage aide à la localisation de ces zones mal classées. Il faut dès lors envisager soit des développements spécifiques en fonction de la statistique de ces points, soit une intervention manuelle.

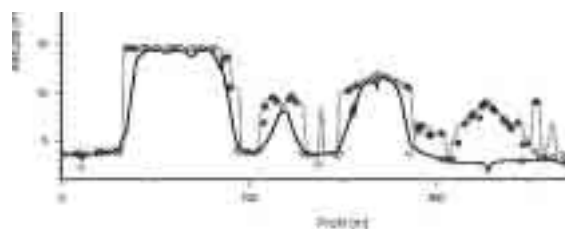
Cependant, compte tenu de la proximité de ces points à la surface sol, le risque d'éliminer des points décrivant réellement un micro-relief est grand.

#### Résultats

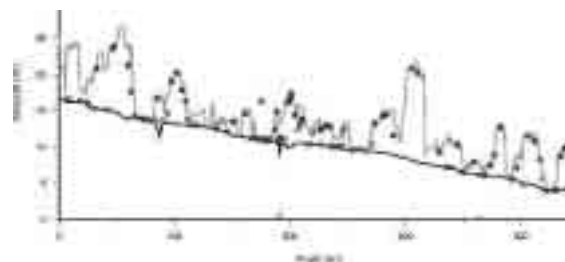
Une fois le filtrage des données effectué, la classification des données SHOM et IFREMER donne de bons résultats sauf, comme indiqué précédemment, sur les îles et les grandes zones de sursol.

De même, les Modèles Numériques de Terrain générés à partir de l'étape de classification s'avèrent de bonne qualité. Les erreurs locales rencontrées proviennent des problèmes de classification.

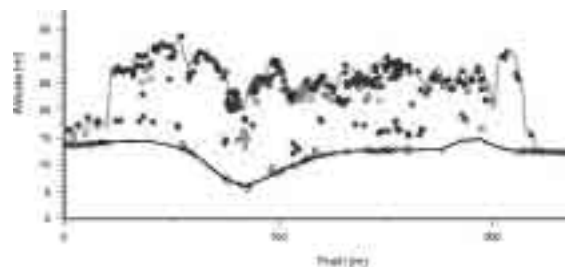
Aucun processus de qualification automatique globale des résultats n'a été mené. Cependant, la réalisation de profils altimétriques sur les nuages de points classés et les MNT réalisés montrent d'une part la qualité du processus de segmentation des nuages de points et d'autre part la cohérence de la surface terrain reconstruite par rapport aux points laser « sol ».



(a) Zone urbaine avec larges zones de sursol (usines).



(b) Zone urbaine dense



(c) Zone de végétation dense.

**Figure 10** : Exemples de profils altimétriques sur des nuages de points laser classés (rouge=sursol, vert=bas-sursol, jaune=sol), MNS (ligne continue grise) et MNT (noire).

<sup>1</sup> C'est en particulier vrai pour les données SHOM. Pour le chantier IFREMER, la densité de points sur des zones littorales humides est parfois très proche de celle observée sur le plan d'eau. Le masque de densité n'est donc plus pertinent.

La figure 10 illustre ces propos avec des exemples de profils en milieu urbain avec de vastes structures anthropiques (figure 10a), en centre-ville dense, avec présence d'artefacts (figure 10b) et sur une zone de végétation dense (figure 10c) où malgré la faible proportion de points laser appartenant au sol, l'algorithme parvient tout de même à reconstruire la topographie sous la canopée.

L'utilisation de la plate-forme iSYSTEMER dans un cadre applicatif à grande échelle a permis le traitement de l'intégralité des données disponibles sur la zone d'étude (près de 320 millions de points). Toutes les données ont pu être classées de manière totalement automatique et en conséquence un MNS et un MNT topographiques créés sur une zone couvrant près de 320km<sup>2</sup> dans des temps de calculs raisonnables.

Nous présentons sur la figure 11 la fusion d'un MNT bathymétrique et d'un MNS topographique sur le Golfe du Morbihan calculé avec la plate-forme iSYSTEMER.

## 5. Conclusion et perspectives

La technologie lidar aéroporté émerge aujourd'hui nettement dans le paysage cartographique altimétrique français, particulièrement en ce qui concerne l'aménagement des zones à enjeux. Le traitement de telles données altimétriques de manière automatique et en des temps raisonnables est un objectif de recherche appliquée mis en valeur par l'IGN et dont la réussite contribuerait à faire baisser les futurs coûts de production. Le projet Litto3D© est une première phase de cette cartographie à grande échelle sur une partie du territoire national.

L'outil iSYSTEMER développé au MATIS est un prototype de plate-forme modulaire sur laquelle peut être intégré une algorithmie variée, de la classification automatique à la reconstruction automatique de bâtiments, ou bien la segmentation de zones forestières. Nous envisageons de faire une comparaison des performances entre une chaîne de traitement commerciale utilisée par Litto3D© et les algorithmes/architecture implémentés dans iSYSTEMER.

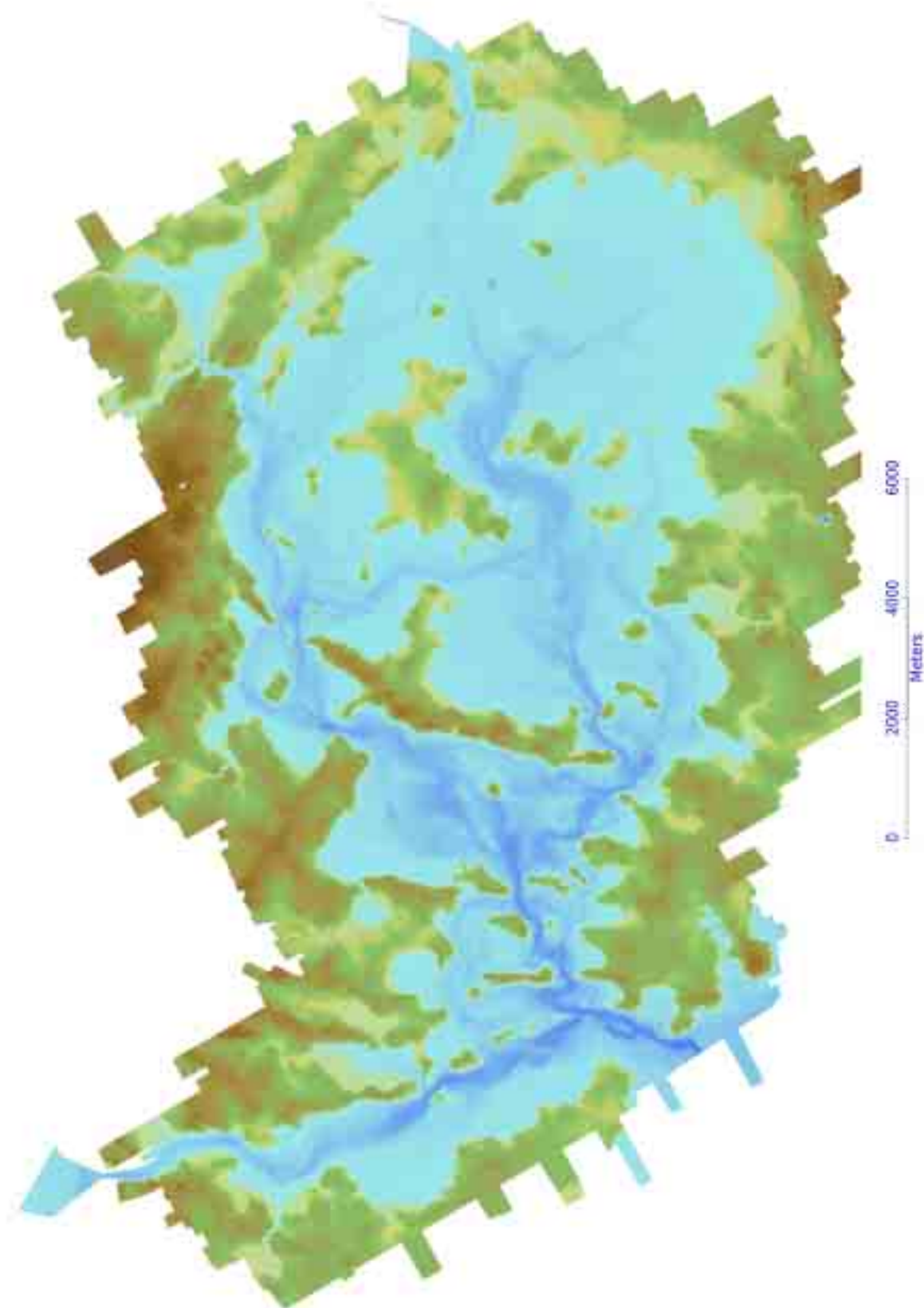
iSYSTEMER est un cadre méthodologique. Le développement des activités lidar dans de nombreux domaines (archéologie et gestion forestière par exemple) conduit à l'élaboration de nouveaux traitements parfaitement intégrables dans iSYSTEMER. La disponibilité de données laser « full-waveform » plus riches en information structurelle sur le sursol (notamment sur la végétation) ouvre nombre de potentialités algorithmiques intégrables naturellement à iSYSTEMER.

## Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le SHOM et l'IFREMER pour la mise à disposition des données utilisées dans cet article.

## Bibliographie

- [Bretar, 2006] F. Bretar. Couplage de Données Laser Aéroporté et Photogrammétriques pour l'Analyse de Scènes Tridimensionnelles. Thèse de Doctorat de l'ENST Paris, juin 2006.
- [Bretar et Chehata, 2007] F. Bretar et N. Chehata. Digital Terrain Model on Vegetated Areas : Joint Use of Airborne Lidar and Optical Images. Proceedings of the ISPRS conference Photogrammetric Image Analysis, Munich, Allemagne, septembre 2007
- [Bretar, 2007] F. Bretar. Processing Fine DTM using Markovian Regularization. Dans Proceedings of IEEE ICIP'07, San Antonio, États-Unis, septembre 2007.
- [Bretar et al, 2007] F. Bretar, C. Mallet, N. David. Analyse de données lidar aéroporté en zone littorale : Etude sur le Golfe du Morbihan, Rapport Technique IGN/MATIS, mai 2007.
- [Condor, 2007] <http://www.cs.wisc.edu/condor/>, consulté le 21 mai 2007.
- [Grass, 2006] Grass Development Team. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software. Itc-irst, Trente, Italie, <http://grass.itc.it>, 2006.
- [Hodgson et al., 2004] M. E. Hodgson and P. Bresnahan. Accuracy of airborne lidar-derived elevation : Empirical assessment and error budget, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 70 (3), pp. 331-339, 2004.
- [Hug et al., 2004] C. Hug, F. Krzystek et W. Fuchs. Advanced Lidar Data Processing with LASTools. Dans Proceedings of the XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turquie, juillet 2004.
- [Huising et al., 1998] E. J. Huising and L. M. Gomes Pereira. Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications. ISPRS journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 53 (5), pp. 245-261, 1998.
- [Katzenbeisser, 2003] P. Katzenbeisser. About Calibration of Lidar sensors. Dans Proceedings of the ISPRS workshop '3D Reconstruction from Airborne Laserscanner and InSAR', Dresde, Allemagne, octobre 2003.
- [Luethy et al., 2005] J. Luethy, H. Ingensand et R. Steingele. Production Suite for Airborne Data. Dans Proceedings of the 7th Conference on Optical 3-D Measurement Techniques, Vienne, Autriche, octobre 2005.
- [Mostafa et al., 2001] M. Mostafa, J. Hutton, B. Reid. GPS/IMU products - the Applanix approach, The Photogrammetric Week, pp. 63-83, 2001.
- [Pierrot-Deseilligny et al, 2006] M. Pierrot-Deseilligny, N. Paparoditis. A Multiresolution and Optimization-Based Image Matching Approach: An Application to Surface Reconstruction from SPOT5-HRS Stereo Imagery. Dans Proceedings of the ISPRS Conference Topographic Mapping From Space (With Special Emphasis on Small Satellites), Ankara, Turquie, 2006.
- [Soininen, 1999] A. Soininen. Terra Scan for MicroStation, user's guide. Terra Solid Ltd., Helsinki, Finlande, 1999.
- [Sithole et al., 2003] G. Sithole and G. Vosselman. Comparison of filtering algorithms. Dans Proceedings of the ISPRS Workshop III/3 '3D Reconstruction from Airborne Laserscanner and InSAR', Dresde, Allemagne, octobre 2003.
- [VLS, 2005] Visual Learning Systems. The LIDAR Analyst™ Extension for ArcGIS™. A Visual Learning Systems White Paper, [http://www.vls-inc.com/lidar\\_analyst.htm](http://www.vls-inc.com/lidar_analyst.htm), septembre 2005.
- [Wack, 2005] R. Wack. Laser DTM generation for South-Tyrol and 3D visualization. Dans Proceedings of the ISPRS workshop 'Laserscanning 2005', Enschede, Pays-Bas, 2005.



**Figure 11** : Fusion d'un Modèle Numérique de Surface topographique et d'un Modèle Numérique de Terrain bathymétrique sur le Golfe du Morbihan.

# EPAISSEUR D'EAU MINIMALE MESURABLE EN RIVIERE SUR FRONTS D'ONDES LIDAR SIMULES

Audrey Lesaignoux, Jean-Stéphane Bailly, Tristan Allouis, Denis Feurer

UMR Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale  
Cemagref-Engref-Cirad  
500 rue J.F. Breton

34 093 Montpellier Cedex 5, France

E-mails : audrey.lesaignoux@wanadoo.fr / {bailly/allouis/feurer}@teledetection.fr

## Résumé

La connaissance de la bathymétrie et de la topographie des surfaces continentales immergées est limitée par les techniques actuelles en terme de couverture spatiale, pour des problèmes d'accessibilité et de plage de mesures. Ces limites ont des conséquences directes sur les possibilités d'études hydrauliques et écologiques aux échelles de gestion des eaux continentales. Pour cartographier la bathymétrie sur de grands linéaires de rivières, le LiDAR<sup>1</sup> Bathymétrique peut apparaître une technique de télédétection prometteuse. Cependant, s'il existe des références sur la précision et les limites des mesures par cette technique dans le cadre des zones littorales, peu de références existent sur les eaux continentales. Afin de juger de l'utilité du LiDAR bathymétrique sur rivière, cette étude cherche à estimer la profondeur d'eau minimale  $H_{inf}$ , que l'on peut théoriquement détecter par LIDAR en fonction de caractéristiques de la rivière, notamment de la surface de l'eau (rugosité, pente longitudinale). Pour ce faire, un modèle de train d'ondes LiDAR vert, à partir de paramètres du système LiDAR et de la rivière, a été développé. Un ensemble de trains d'ondes a été simulé suivant ce modèle et une méthodologie d'estimation de la limite recherchée  $H_{inf}$ , est proposée. Pour un premier jeu de paramètres de référence (pente nulle et rugosité moyenne de la surface de l'eau), l'épaisseur d'eau minimale théoriquement mesurable est  $H_{inf} = 0.41$  m avec pour intervalle à 95 % [0.31, 0.45]. D'autres valeurs de rugosité ont été testées et laissent apparaître un optimum de rugosité peu significatif. La méthodologie développée, une fois validée sur des données expérimentales, pourrait être étendue pour étudier la sensibilité de  $H_{inf}$  et de la mesure bathymétrique à une gamme plus large de paramètres de la surface de l'eau et du système LiDAR.

**Mots Clés** : Métrologie ; LiDAR Bathymétrique ; rivières ; Modélisation de front d'onde ; Rivières ; Rugosité ; BDRF.

## Abstract

*Bathymetry on continental hydrographic networks is up to now limited to small areas. This hampers exhaustive hydrological or ecological studies on hydrographic networks at management scales. To enlarge rivers bathymetry surveys, bathymetric, i.e. green LiDAR appears as an interesting tool. But if this technique has been widely used for coastal surveys, very few studies focus on water depth measurement quality and limits, in particular for rivers. We aimed here to assess the utility of LiDAR for bathymetry on rivers, in particular the minimum water depth  $H_{inf}$  we can theoretically measure with LiDAR, depending on LiDAR system and surface water characteristics. To do so, we developed a model depending on LiDAR parameters and introducing specificities for rivers (roughness and longitudinal slope for water surface). Then, we assessed from a set of simulated full waveforms the inferior limit  $H_{inf}$ . In case of mean rough and no longitudinal slope for water surface, a minimum water depth of  $H_{inf} = 0.41$  m has been found with the 95 % confidence interval [0.31, 0.45]. Some additional tests using different rugosity values show that a lowly significant rugosity optimum exists. These first results have to be experimentally validated then it could be extended to study the minimum water depth or depth measure quality sensitivities to LiDAR system and water surface parameters.*

**Keywords** : Measure; Bathymetric LiDAR; rivers ; full waveform model; rivers; rugosity, BDRF

## 1. Introduction

La connaissance de la profondeur ou de la topographie des surfaces immergées est un point d'entrée incontournable pour l'amélioration de la connaissance des milieux aquatiques littoraux et continentaux. Actuellement, le SONAR multi-faisceaux est la technique de bathymétrie (mesure de la profondeur) principalement utilisée sur les surfaces immergées continentales. Cette technique présente plusieurs limitations : extension spatiale limitée, difficulté de mise en œuvre sur des rivières peu navigables ou accessibles, profondeur d'eau mesurable supérieure à 1.5 m. Ces limitations ont des conséquences sur les possibilités d'études hydrauliques

et écologiques des eaux continentales, notamment pour les rivières à forte évolution et haut potentiel écologique, qui présentent généralement des eaux courantes (faible navigabilité) et des faibles profondeurs. Pour cartographier la bathymétrie sur de grands linéaires de rivières, le LiDAR bathymétrique ou "hydrographique" (LiDAR « vert ») apparaît une technique de télédétection potentiellement adaptée, complémentaire du SONAR [Feurer et al., 2006].

Le LiDAR bathymétrique, développé initialement pour les relevés en zone littorale, a pour principe l'émission-réception d'impulsions lasers intenses (plusieurs mégawatts), à fréquence régulière, dont la durée de cheminement est transformée en distance

<sup>1</sup> Light Detection And Ranging