

M301R201-POP A

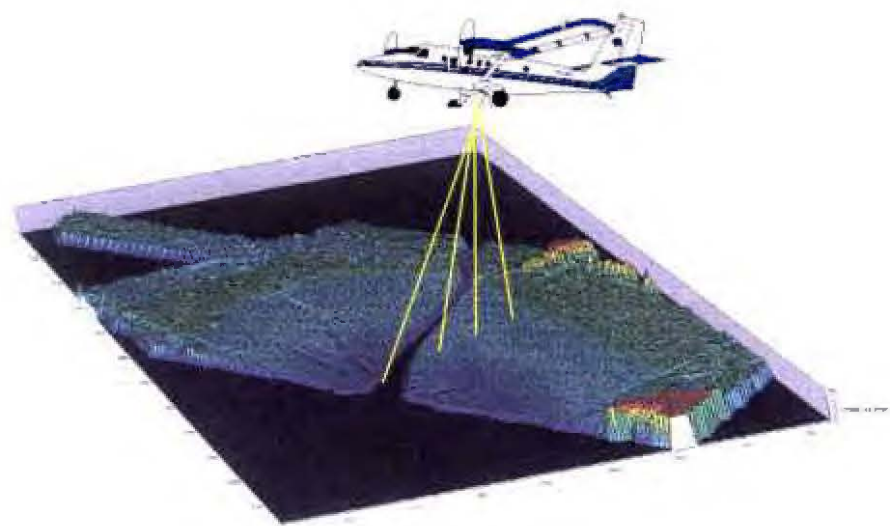
Direction de l'Environnement et de l'Aménagement Littoral
Service des Applications Opérationnelles

Jacques POPULUS

RST.DEL/AO/BREST 02-09
Décembre 2002

ifremer

Altimétrie par Lidar aéroporté Et Modèles Numériques de Terrain



M301
R201
POP
A

IFREMER Bibliothèque de BREST



OEL09765

SOMMAIRE

Introduction : Intérêt d'une connaissance fine de la topographie côtière	2
1 Technique d'acquisition topographique par laser aéroporté (Lidar)	3
Principe de fonctionnement du Lidar	3
Porteur et capteur	4
Préparation du vol	6
2 Aspects géodésiques	8
Systèmes de projection	8
Acquisition de mesures de contrôle	10
GPS différentiel	11
Rattachement des altitudes	12
3 Produits issus de la campagne de mesure	13
Pré-traitements effectués par l'opérateur	13
Description des données et produits	14
Description des fichiers	16
4 Outils et méthodes d'analyse et de validation des données	16
Extraction et import de sous-zones	16
Outils de comparaison statistique	16
Confection du modèle numérique de terrain	17
5 Exemple de résultats sur l'anse de l'Aiguillon, Charente-Maritime	17
Présentation de la zone d'étude	17
Validation des données sur sol nu	18
Considérations en zone de schorre	20
Confection d'un MNT mixte Lidar/sondes sur sous-zone	21
Confection d'un MNT global	22
Confection de sous-modèles à maille fine	23
6 Conclusion et perspectives	25
Références	26
Annexe 1 : Erreurs affectant la mesure Lidar (Huisling, 1998)	27
Annexe 2 : La routine d'extraction AVPIP	28

Introduction : Intérêt d'une connaissance fine de la topographie côtière

Les estrans et les zones basses et inondables attenantes ont toujours souffert d'un large désintérêt de la part des gestionnaires de l'espace. A la faveur des catastrophes répétées de ces dernières années, un regain d'intérêt s'est fait jour pour à la fois prévoir et établir des scénarii, gérer le milieu en temps de crise, voire dédommager par la suite.

La connaissance fine des zones côtières, au plan patrimonial comme à celui des activités économiques, est essentielle. Des programmes se mettent en place tel le Rebut, qui vise à réaliser un inventaire renouvelable des habitats des zones découvertes et des petits fonds.

Parmi les données de base nécessaires à une telle entreprise, on trouve les données physiques de topographie et de géomorphologie. En zone immergée, la bathymétrie est aujourd'hui mesurée par sonar multifaisceaux. En zone d'estran de faible déclivité et d'accès difficile aux moyens nautiques comme d'arpentage, les techniques conventionnelles de type stéréophotogrammétrie, tachymétrie, relevés terrain par GPS permettent difficilement d'acquérir une information topographique précise et complète : la photogrammétrie est fortement contrainte par les faibles contrastes affectant certaines zones sédimentaires, quant aux mesures de terrain, elles ne peuvent être que ponctuelles. Les levés bathymétriques sont, quant à eux, inopérants du fait de la faible profondeur à pleine mer sur la moitié haute des estrans. Enfin, toutes ces techniques sont gourmandes en temps et en ressources.

Avec le développement du laser la technique Lidar (LIght Detection And Ranging) est passée en quelques années du stade expérimental à une large utilisation (Vaessen, 1999). En alliant le laser avec des capteurs à haute technologie, il est en effet devenu possible d'acquérir une télémessure précise de l'altitude d'un point du sol.

Cette technique présente les avantages suivants :

- non-invasive, elle respecte les zones fragiles ;
- elle donne accès à des espaces situés au-delà des zones atteintes par les levés bathymétriques classiques qui s'arrêtent, pour des raisons de tirant d'eau, environ 4 mètres sous le niveau des plus hautes mers ;
- les levés bathymétriques à grande échelle sont effectués en général selon des profils espacés de 100 mètres au mieux, ce qui ne permet pas d'appréhender finement la topographie. Le Lidar offre un échantillonnage fin et régulier de l'espace.

Une connaissance topographique fine permettrait de pallier le manque de données précises sur :

- les structures géomorphologiques à grande échelle, notamment le trait de côte, dont une application immédiate est la cartographie des risques de submersion,
- l'ampleur des phénomènes sédimentaires,
- la topographie de détail nécessaire aux modèles hydrodynamiques à maille fine appliqués à des problématiques très locales (rejets et dilution, phénomènes sédimentaires fins, capacité trophique, etc...),
- l'emprise spatiale des tables ostréicoles ou de tout autre aménagement de l'estran, utile à une meilleure gestion des activités,
- les infrastructures qui obstruent le paysage (occupation des rives par les habitations et la végétation) en vue d'applications paysagères ou patrimoniales.

1 Technique d'acquisition topographique par laser aéroporté (Lidar)

Principe de fonctionnement du Lidar

Le concept du Lidar, acronyme signifiant *Light Detection And Ranging*, c'est-à-dire détection de la lumière et mesure à distance, découle de celui du laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Il est très proche de celui du radar, la seule différence étant la gamme de longueur d'onde utilisée (figure 1). Au contraire du radar qui fonctionne en hyperfréquences, le Lidar travaille à plus haute fréquence, dans le domaine optique, de l'ultraviolet au proche infrarouge avec des longueurs d'onde typiquement de l'ordre du micromètre.

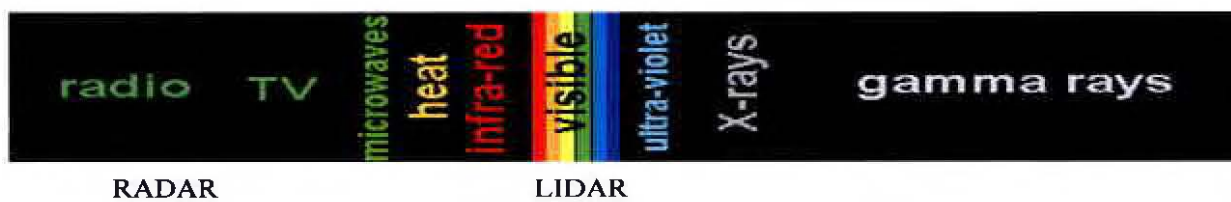


Figure 1 : Spectre électromagnétique et domaine d'application du Lidar

Le Lidar est une technique de télédétection « active » (avec émission de lumière) utilisant la technique du laser pour la collecte, à distance, de données concernant la scène que l'on observe. Elle se distingue ainsi des méthodes dites passives basées sur le rayonnement naturel telles que la spectroscopie ou la photographie aérienne. De multiples systèmes Lidar ont jusqu'à présent été développés mais tous consistent en l'association de trois instruments : un système à impulsion laser, un récepteur ou détecteur optique et un système d'acquisition.

Le principe de fonctionnement en lui-même est simple (figure 2) : l'appareil laser génère, à intervalles réguliers, une série d'impulsions lumineuses intenses (plusieurs mégawatts), modulées à une fréquence choisie en fonction de l'information recherchée. Ces impulsions sont émises en direction de l'objet d'étude, lequel peut être une surface solide, liquide ou gazeuse (sol nu, sol recouvert de végétation, glace, couche atmosphérique, mer,...). La cible est en réalité tout objet susceptible de réfléchir le signal (Measures, 1997 ; Ritchie et *al.*, 1995).

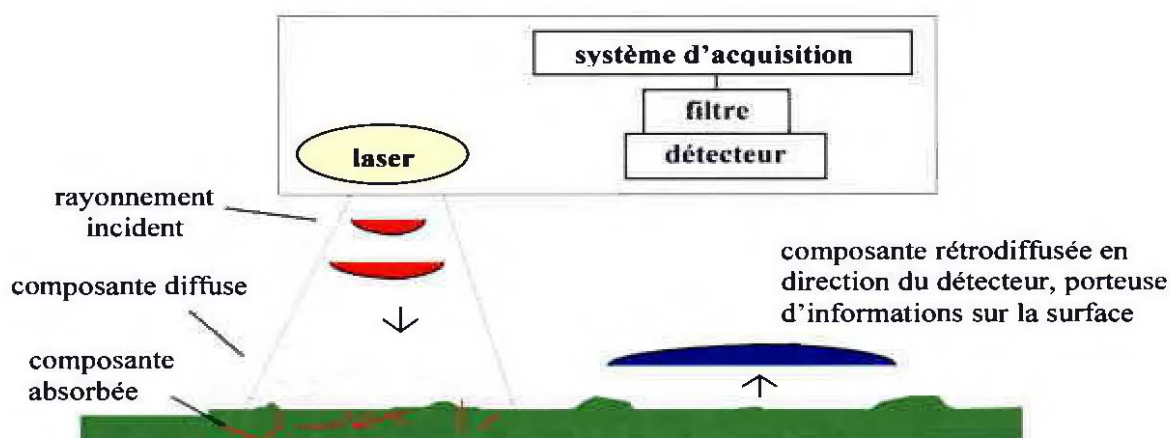


Figure 2 : Principe d'un système actif Lidar

En interagissant avec la surface, le signal se scinde en plusieurs composantes : l'une est diffusée ou absorbée par le milieu, l'autre est réfléchi et en partie renvoyée en direction de la source du rayonnement laser.

L'interaction avec le milieu modifie certains de ses paramètres physiques tels que la fréquence, l'intensité, la phase. De plus, l'écart en temps entre l'instant d'émission et l'instant de réception du signal est représentatif de la distance parcourue par ce dernier, donc de la distance séparant la source de rayonnement de la scène qu'on utilise pour reconstituer le relief (Samberg, 1997 ; Measures, 1997). L'intensité quant à elle est une luminance, couramment utilisée à l'état passif en télédétection.

Aujourd'hui, la technique Lidar constitue une puissante technique pour étudier de nombreux aspects de l'environnement. Les observations se multiplient et s'effectuent aussi bien depuis le sol, d'une plate-forme aéroportée ou de l'espace (la NASA a procédé à la première expérience de télédétection Lidar depuis la navette Discovery en Septembre 1994). Les domaines d'applications auxquels elle répond sont nombreux : étude de l'atmosphère (Measures, 1997), topographie (Krabill, 1984 ; Ritchie, 1995), cartographie, hydrographie (Lillycrop, 1996), hydrologie (Ritchie et al., 1997), bathymétrie (Krabill et al., 1994 ; O'Reilly, 2000), reconnaissance et inventaire des forêts (Krauss, 1997), surveillance des infrastructures et de l'environnement, contrôle de pollution, volcanologie (Garvin et al., 1996).

Porteur et capteur

Il existe deux concepts distincts utilisés pour évaluer la distance via une impulsion laser. Le plus commun consiste à mesurer le temps d'aller-retour du signal (figure 3). La seconde méthode revient à émettre un signal continu, modulé à une certaine fréquence puis à mesurer la différence de phase entre le signal émis et le signal réfléchi. Les systèmes utilisant ce procédé restent rares à l'heure actuelle (Hug, 1996 ; Ritchie, 1996).

Plusieurs types de balayage sont aujourd'hui possibles mais le plus commun consiste à utiliser un miroir mobile suivant un seul axe. La largeur de fauchée est alors typiquement de l'ordre de 70% de l'altitude. Les systèmes actuels autorisent désormais la collecte simultanée d'un très grand nombre de points de mesure, ce qui réduit considérablement la durée d'une mission. Le choix du système se fait en fonction de l'information recherchée et de la densité des mesures que l'on souhaite (Samberg, 1997).

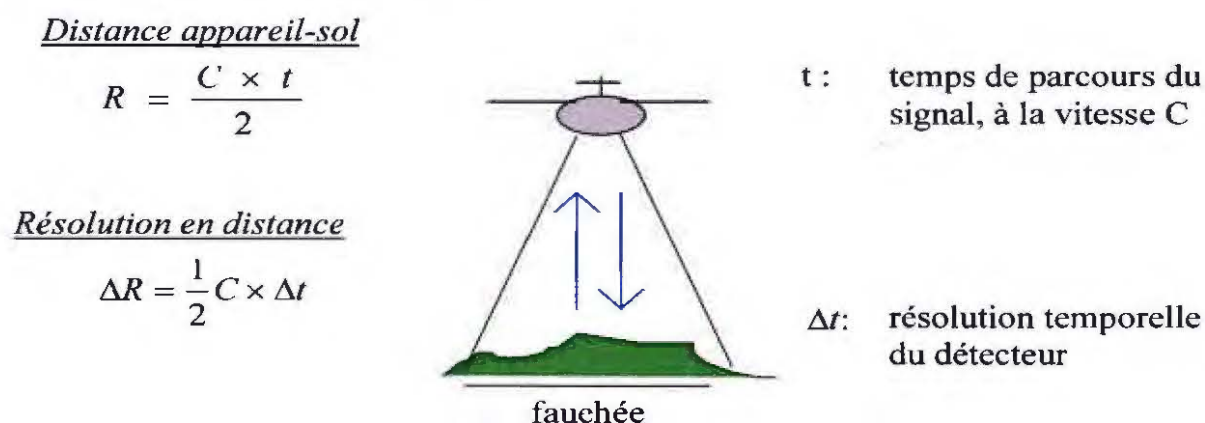


Figure 3 : Principe de la mesure de distance par laser aéroporté

Pour acquérir des données altimétriques exploitables, à savoir les coordonnées (X, Y, Z) des points du sol atteints par le faisceau laser, il est nécessaire de connaître la position par rapport au paysage de la plate-forme qui porte l'altimètre laser. Pour cela, on intègre à l'appareillage plusieurs capteurs haute technologie supplémentaires (Van De Kraats, 1999 et figure 4) :

- L'altimètre laser est un système à balayage constitué de deux éléments, une source laser et un miroir, assurant la mesure de la distance qui sépare l'avion de la surface. La source laser émet, à intervalles réguliers (fréquence d'échantillonnage) un rayonnement haute fréquence (100 - 80000 Hz) d'une durée de 1 à 10 nano-secondes. En général, la longueur d'onde de la lumière incidente est choisie pour ne pas pénétrer le matériau de surface, en particulier l'eau (excepté dans le cas du Lidar bathymétrique) et se situe pour cela dans l'infrarouge, avec comme valeurs typiques 1.047 μm , 1.064 μm et 1.54 μm . L'intensité élevée du signal (de l'ordre du mégawatt) lui garantit un trajet sur une longue distance et permet de travailler en réflexion. Le miroir se charge d'orienter l'impulsion en direction de la surface.
- Le système de positionnement GPS (Global Positioning System) détermine très précisément la position de l'avion à une fréquence de 1 Hz et par conséquent celle de l'altimètre laser au cours de la télémessure. Ceci est nécessaire pour localiser dans l'espace les points atteints par le laser et recueillir ainsi, des données altimétriques géoréférencées. Un récepteur GPS mono ou bi-fréquence pouvant travailler en mode différentiel avec une station GPS fixée au sol et géoréférencée est pour cela intégré à la plate-forme. La trajectoire de l'avion est finalement déterminée avec une marge d'erreur avoisinant 3 cm (Bossler, 1996).
- La centrale de navigation interne INS (Inertial Navigation System), composée d'inclinomètres et d'accéléromètres, est utilisée pour déterminer les accélérations et les changements d'attitude du laser scanner occasionnés par les mouvements de l'avion au cours du vol (roulis, lacet, tangage). La direction de visée est ainsi connue. L'INS procure des informations fiables et de haute précision en trois dimensions à court terme, lorsque le GPS ne le permet pas ou est indisponible (nombre de satellites en visibilité insuffisant, interférences électromagnétiques, environnement présentant des risques de multi-trajets, obstruction du signal des satellites,...) (Bossler, 1996).



Figure 4 : Vue de l'avion Cessna et du système laser : capteur Optech ALTM 1020 à gauche, INS et récepteur GPS à droite

Dans le cas d'une mission effectuée en 2000 sur l'Anse de l'Aiguillon, le système était constitué de l'intégration de trois capteurs sur une plate-forme aéroportée (figure 4), dont les principales caractéristiques figurent dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Les instruments constituant le Laser aéroporté
(mission de l'Aiguillon, mai 2000)

Récepteur GPS	modèle bi-fréquence Aquarius 5002
Altimètre laser ALTM1020 (Airborne Laser Terrain Mapper)	fréquence d'émission : 5000 Hz longueur d'onde scanner : 1.047 μm fréquence de balayage : 12 Hz scan angle : 19° largeur de fauchée maximale : 504 m altitude moyenne : 700 m vitesse de l'avion : 70 m/s tache insolée : 25 cm^2 recouvrement latéral : 30%
INS	centrale de navigation inertielle

Préparation du vol

La préparation des axes de vol en fonction de la marée

La figure 5 ci-après présente deux exemples de plan de vol.

Les axes de vol sont des lignes parallèles de recouvrement 30 %, qui devront être orientées en tenant compte des facteurs suivants : a) optimiser le temps d'acquisition des lignes de bas d'estran, b) être les plus longues possible afin de diminuer la part relative des demi-tours. A titre indicatif, un demi-tour dure environ 4 minutes, ce temps permettant à la vitesse de 75 mètres par seconde (150 nœuds) de couvrir une longueur d'axe de 18 km. Une disposition optimale évitera donc autant que possible les axes courts.

La largeur de fauchée est de 0,7 fois l'altitude, soit 700 mètres pour un vol à 1000 mètres. Compte-tenu du recouvrement de 30 %, la fauchée effective est de seulement 500 mètres.

On montre ci-après deux schémas d'axes de vol, d'une part l'estuaire de la Vilaine, où l'orientation générale de la zone a permis de constituer des axes d'une longueur de 20 km environ inscrits dans un rectangle, d'autre part la baie du Mont Saint-Michel où la zone d'estran a été découpée en trois trapèzes contenant les axes de vol.

On peut retenir qu'un taux typique de couverture en zone côtière se situe à 30-40 km^2 par heure.

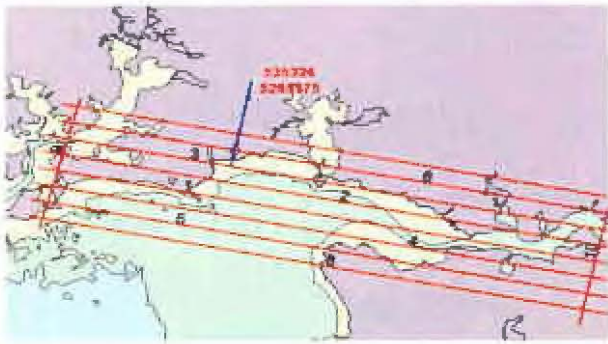
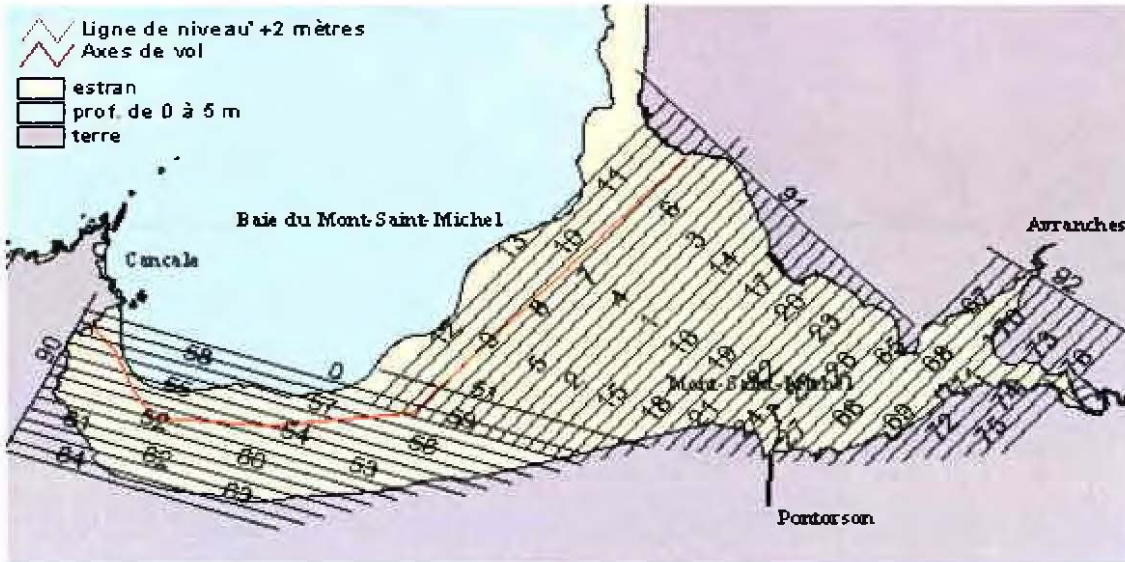


Figure 5 : Exemples de plan de vol
 a) estuaire de la Vilaine,
 b) baie du Mont Saint-Michel.



On devra conjuguer l'organisation des axes avec la disposition des zones de bas de l'eau pendant la fenêtre de basse-mer autorisée. Suivant la hauteur d'eau maximale que l'on s'autorise, la fenêtre de levé des zones du bas estran sera plus ou moins étroite. Sur la figure 5a, on a noté les numéros d'axe de 1 à 8. L'axe 1 ayant démarré ici à BM-30 minutes, on assure ainsi un niveau d'eau minimal aux 5 premiers axes pour ensuite « remonter » avec la marée. Dans la baie du Mont Saint-Michel, où la surface est 5 fois plus grande, le vol démarre 2 heures avant la basse-mer sur un l'axe 1 à mi-pente de manière à « descendre » avec la marée et terminer avec l'axe 13.

On donne à titre indicatif dans le tableau 2 ci-dessous les valeurs de hauteur d'eau pour la marée de coefficient 115 du 7 octobre 2002 à Saint-Malo (basse-mer à 14.32 TU+1, hauteur 0.6 m). On voit qu'il y a dissymétrie entre le jusant et le flot, puisque pour BM-1h et BM+1h, les hauteurs d'eau sont respectivement de 1.50 m et 1.80 m. On aura donc toujours intérêt à privilégier la fin de jusant.

Tableau 2 : Exemple de calcul de marée du 7 octobre 2002 en baie du Mont Saint-Michel. Les variations de hauteur sont supposées linéaires sur la période BM-1/BM+1

Heure (TU+1)	13.22	13.32	13.42	13.52	14.02	14.12	14.22	14.32	14.42	14.52	15.02	15.12	15.22	15.32
Hauteur (m)	1.65	1.50	1.35	1.20	1.05	0.90	0.75	0.60	0.80	1.00	1.20	1.40	1.60	1.80

Veille météorologique

Une veille météorologique locale pourra être menée à 3 jours, en accompagnement de la prévision menée par le prestataire. En général, la décision d'acheminer le matériel sur place est prise 48 à 36 heures avant le vol. Un ciel clair n'est pas nécessaire, mais on recherchera des conditions de plafond nuageux au moins égal à 700 mètres, l'idéal étant 1000 mètres, ceci afin d'assurer la plus grande largeur de balayage. Par situation générale de beau temps, les contraintes de jour sont les cumulus, qui envahissent le ciel avant l'heure de basse mer atlantique typique (12 heures TU). Bien que situés sur les marges continentales, ils affectent aussi en général les zones d'estran plus « indentées ». En outre, leur base est souvent inférieure à 1000 mètres. Pour les acquisitions de nuit, la contrainte provient des entrées maritimes qui provoquent des brumes se mettant en place entre 0 heure et 3 heures TU environ. En outre, les grandes vives-eaux ayant lieu par nouvelle lune, il est très difficile pour l'opérateur de savoir si des brumes s'étendent entre l'avion et le sol.

2 Aspects géodésiques

Systemes de projection

L'altimétrie repose entièrement sur la maîtrise de la géodésie : les mesures recueillies par laser ne peuvent en effet être utilisées que si elles sont correctement géoréférencées, dans un système de coordonnées adapté au milieu étudié. Les possibilités sont nombreuses et variées pour se repérer dans l'espace et par rapport à la surface, et il existe plusieurs référentiels géodésiques.

Un point dans l'espace est repéré par trois coordonnées sphériques (λ , φ , h). Celles-ci sont exprimées par rapport à un référentiel géodésique. Pour déterminer la position des points à la surface terrestre, on définit une surface mathématique la plus proche possible de la surface réelle. Cette surface est l'ellipsoïde de révolution (figure 6). Les coordonnées sont alors dites géographiques et un point M est ainsi repéré par :

- sa longitude λ ,
- sa latitude φ ,
- sa hauteur MH par rapport à l'ellipsoïde de révolution.

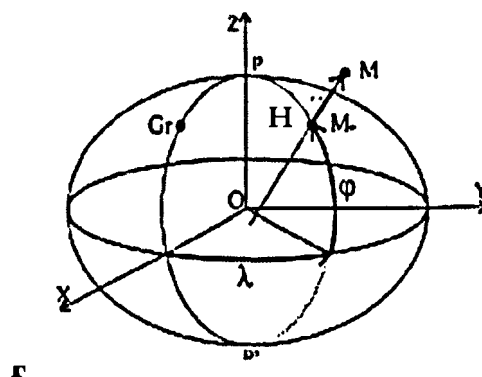


Figure 6 : Système de coordonnées géographiques

L'ellipsoïde international reconnu actuellement est l'IAG GRS 1980. Mais il en existe d'autres : Clarke, Hayford, ... La notion d'altitude est beaucoup plus complexe car il existe différentes manières de la mesurer. Traditionnellement, on l'a toujours évaluée par rapport au niveau moyen des mers, lequel est très variable selon la marée, la gravité... La mesure des

altitudes nécessite en effet une surface de référence, le *géοide*, qui est défini comme la surface équipotentielle du champ de pesanteur proche du niveau moyen des mers. L'altitude h traduit alors un éloignement par rapport à ce géοide (figure 7).

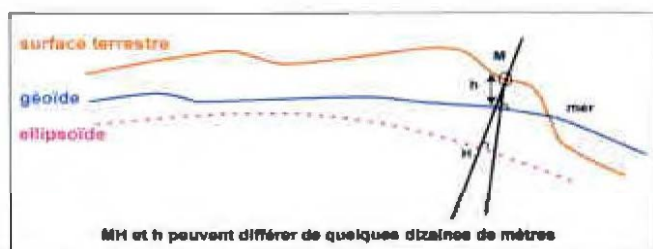
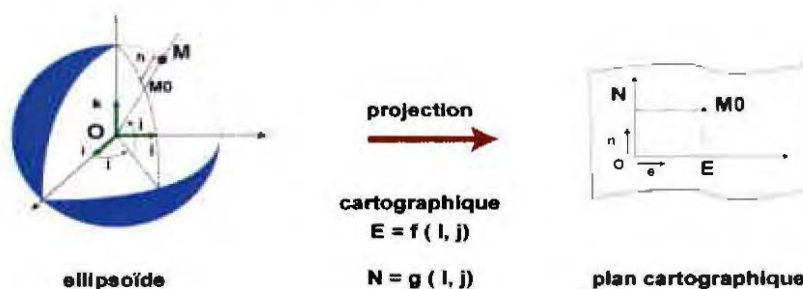


Figure 7 : Système de référence altimétrique

Jusqu'à présent, deux systèmes de référence étaient nécessaires pour un positionnement dans l'espace : un pour la planimétrie, défini par un ellipsoïde de révolution, l'autre pour l'altimétrie basé sur un modèle de géοide. Le problème est que de nombreux systèmes cohabitent car chaque pays a adapté son propre référentiel géodésique pour que l'ellipsoïde soit le plus possible confondu avec le géοide. Aussi, pour homogénéiser l'ensemble, des systèmes globaux ont récemment été développés dont le système WGS84 (*World Geodetic System 1984*) et finalement, pour repérer un point M de la surface terrestre, deux grandeurs suffisent (cf. figure 9) : la hauteur ellipsoïdale MH ainsi que l'altitude h ou éloignement par rapport au géοide, appelée en France altitude IGN69.

Pour passer des coordonnées sphériques à une représentation plane (cartes), on applique ensuite une projection. Il s'agit de représenter une portion de l'ellipsoïde sur un plan. Il convient pour cela de définir une fonction mathématique destinée à projeter point par point l'ellipsoïde sur un plan, qui est la projection cartographique (figure 8).

Figure 8 : Principe de la projection cartographique

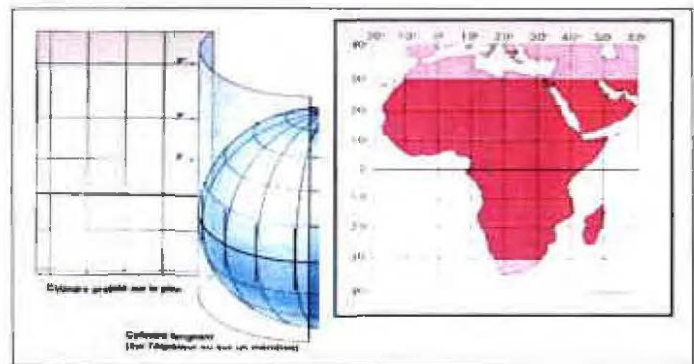


Si l et j sont les coordonnées géographiques d'un point M sur l'ellipsoïde, son homologue MO dans le plan de projection aura pour coordonnées E et N . On distingue deux grandes familles de projection :

- les projections conformes conservent sur le plan les angles observés sur la surface terrestre mais modifient les rapports de surface. Les plus usitées sont les projections coniques conformes de Lambert, Mercator et stéréographiques. Elles servent en géodésie et en topographie ;
- les projections équivalentes conservent les rapports de surface et modifient les angles. Elles sont, pour cette raison, sans intérêt du point de vue topographique mais sont utiles pour la cartographie en général et surtout à petite échelle.

En projection cylindrique, l'ellipsoïde est projeté sur un cylindre tangent le long d'un diamètre de l'ellipsoïde (figure 9). le cylindre ainsi développé sur un plan donne une planisphère qui ne représente correctement que les régions voisines du diamètre tangent. La projection *Universal Transverse Mercator* (UTM) inscrit la Terre ramenée à une sphère, dans un cylindre tangent à un méridien. Ce système de projection est dit « universel » puisqu'il permet de couvrir toute la surface terrestre en minimisant les déformations le long du méridien tangent. Mais celles-ci augmentent vite dès que l'on s'en éloigne. Aussi, on a défini un découpage de la Terre en soixante fuseaux. Dans chaque fuseau, les coordonnées couvrent un champ qui va des pôles à l'équateur et du méridien tangent aux méridiens situés à 3 degrés de part et d'autre.

Figure 9 : Projection cylindrique équatoriale (Mercator)



La projection de Lambert projette les coordonnées géographiques prises sur l'ellipsoïde de Clarke sur un cône tangent à un parallèle et dont le sommet est dans le prolongement de l'axe des pôles. La déformation est inférieure à 12 cm dans un couloir de 100 km autour du parallèle tangent (Figure 10).

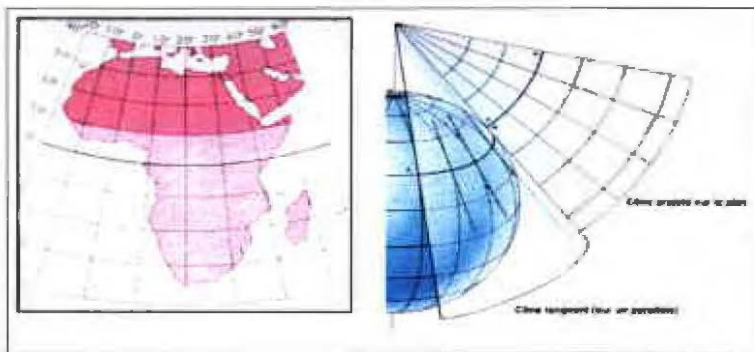


Figure 10 : Projection conique conforme Lambert

La France est divisée en quatre zones : la zone Lambert I (Nord), la zone Lambert II (Centre), la zone Lambert III (Sud) et la zone Lambert IV (Corse) mais globalement, le système est unifié autour de la projection Lambert II qui permet d'avoir tout le territoire métropolitain dans une seule projection.

Acquisition de mesures de contrôle

L'acquisition de mesures de géodésie de terrain a plusieurs objectifs. D'une part ces mesures sont utilisées par le prestataire pour caler ses mesures, d'autre part elles servent de validation. Elles devront être réalisées avec le maximum de précision. Dans l'état actuel des techniques, avec « pseudo-distance » (ou distance séparant les deux stations voir GPS différentiel ci-dessous) inférieure à 10 km, on peut estimer la précision absolue des mesures à mieux que 5 cm.

Pour le calage et le géo-référencement des données Lidar, un certain nombre de zones de référence, de surface environ un hectare, seront acquises par GPS différentiel par un géomètre de terrain. Les zones seront réparties régulièrement aux pourtours de la région levée. A titre d'exemple, pour le chantier du Mont Saint-Michel, il a été nécessaire de lever sept zones homogènes et peu déclives. On a choisi dans la mesure du possible les terrains de sport. Ces zones sont parfois difficiles à trouver, surtout si la visibilité entre les deux stations GPS est requise (acquisition en temps réel) : ça a été le cas dans la presqu'île du Trégor, non remembrée et de relief très accidenté.

Outre ces zones de référence, il est conseillé au commanditaire de procéder au levé de zones de contrôle, qui devront bien sûr être différentes des précédentes. Ces dernières, qui pourront être au nombre de trois à quatre dans le cas du Mont Saint-Michel par exemple, serviront à valider statistiquement les résultats. On verra ci-dessous un exemple de validation.

GPS différentiel

L'idée fondamentale du dGPS est que deux récepteurs observant les mêmes satellites feront des erreurs de mesure d'autant plus semblables que ces récepteurs seront proches. En plaçant un récepteur dit de référence sur une position parfaitement connue, il est possible d'évaluer non pas cette position à partir des mesures qu'il effectue, mais la valeur théorique que devraient avoir ces mesures à partir de la position connue et de les comparer ensuite avec les mesures réelles. La différence de ces valeurs donne l'erreur de mesure, qui va servir à corriger les erreurs de mesure des récepteurs placés sur des positions inconnues.

Ce principe de mesure différentielle ne corrige que les erreurs dues au système, par contre les erreurs locales dues aux récepteurs ou à leur environnement sont cumulées.

Tableau 3 : Différentes sortes de dGPS

Type de mesure	Temps réel / différé	Dénomination	Précision	Zone de validité
Phase code	Temps différé	DGPS ou LADGPS temps différé ou WADGPS temps différé	De < 1 m à ~ 10 m	De quelques x 10 km à quelques x 1000 km
Phase code	Temps réel	DGPS ou LADGPS ou WADGPS	De < 1 m à ~ 10 m	De quelques x 10 km à quelques x 1000 km
Phase porteuse	Temps différé	Statique ou Rapide Statique ou Cinématique	De < 1cm à quelques cm	De quelques km à quelques x 1000 km
Phase porteuse	Temps réel	Cinématique temps réel	De < 1cm à quelques cm	De quelques km à quelques x 10 km

Ce principe n'est valable que pour des mesures simultanées. Il y a donc deux facteurs limitatifs : la décorrélation spatiale des erreurs et leur décorrélation temporelle. Sous sa forme la plus simple, le dGPS ramène la précision du GPS à quelques mètres, sous sa version la plus sophistiquée, à quelques millimètres. Cette précision est largement fonction de la « pseudo-distance » entre les deux récepteurs, qui doit rester en dessous de 15 km environ.



Figure 11 : Illustration du fonctionnement du GPS différentiel

Dans le cas de la mesure en temps réel, les corrections sont calculées « en ligne » et diffusées immédiatement par voie hertzienne vers le récepteur mobile.

La technique utilisée par le système de Lidar aéroporté est la « phase porteuse temps réel » du tableau 3.

Rattachement des altitudes

On donne ici un exemple de travail de géodésie réalisé en Charente-Maritime (plan de situation sur figure 12) lors de la mission Lidar expérimentale de mai 2000.

La borne géodésique IGN de Triaize apparaît sur la figure 12 comme un petit rectangle orange au nord-ouest). Elle fait partie du réseau RBF. Ses coordonnées de qualité centimétrique (tableau 4), dans le double système IGN69 et WGS84, sont obtenues par levé, c'est à dire indépendamment l'une de l'autre. Cette borne présente les qualités requises pour servir de « pivot » à la mission aérienne, car elle ne se trouve jamais à plus de 15 km de l'avion..

Notons en outre que la visibilité entre elle et l'avion n'est pas nécessaire, les deux acquisitions étant indépendantes (mode « post processing » ou temps différé).

Tableau 4 :
Points géodésiques
de référence (Aiguillon)

	Coordonnées (Lambert 2)
Point de référence IGN Triaize (RBF)	X : 328282.12 m Y : 2157225.95 m Z (WGS84) : 50.87 m Z (IGN69) : 3.84 m
Point nivelé Saint Clément	X : 332114.54 m Y : 2145210.34 m Z (WGS84) : 59.31 m Z (IGN69) : 12.35 m

En revanche, pour les levés de terrain, afin d'améliorer cette visibilité (en élevant le pivot en un lieu bien dégagé) et diminuer un peu la ligne de base, on a préféré niveler un point sur la pointe Saint Clément (figure 13) position habituellement utilisée par la DDE pour ses levés bathymétriques.

L'écart entre le géoïde IGN69 et l'ellipsoïde WGS84 ($\Delta 1$) est donné par l'IGN sur la borne RBF de Triaize à 47.03 m. Cet écart diminue de 7 cm entre Triaize et la pointe Saint Clément par suite des variations du géoïde pour s'établir à $\Delta'1 = 46.96$ m. D'après l'annuaire des marées, la position de l'IGN69 par rapport au zéro hydrographique au niveau de la pointe Saint Clément est de 3.50 m (mesure prise identique à celle de La Pallice, port de référence éloigné de seulement 10 km). On en déduit que l'écart $\Delta 2$ recherché entre le zéro hydrographique et l'ellipsoïde WGS84 est de 43.46 m au niveau de la Pointe Saint Clément (figure 12). Les mesures Lidar ont donc été ramenées à des élévations par rapport au zéro hydrographique en leur retranchant cette valeur.

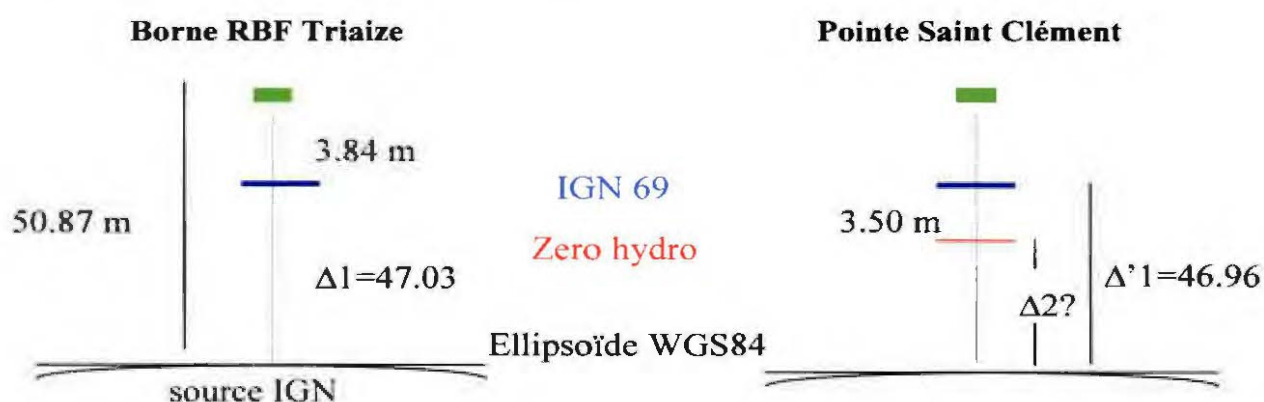


Figure 12 : Rattachement des altitudes WGS84/ Z_{hydro} entre Triaize et Saint-Clément

Plus généralement, la marche à suivre en matière de compatibilité des jeux de données est la suivante :

- les données Lidar étant fournies en hauteurs ellipsoïdales,
- si l'on veut les ramener dans le système IGN69, on utilise le logiciel Circé et la grille RAF98, qui donne avec une résolution de 2.5 km la différence entre les deux systèmes d'altitude,
- si enfin on veut se rattacher au zéro hydrographique (ZH), en attendant que soit disponible bientôt une grille du même type pour l'ensemble du littoral français (travaux en cours au SHOM), on devra considérer le port de rattachement le plus proche et consulter le SHOM sur la variation approximative de l'écart entre ZH et IGN69 entre le port et le site d'étude.

3 Produits issus de la campagne de mesure

Pré-traitements effectués par l'opérateur

Une fois les données collectées, le prestataire se charge de procéder à divers traitements, en vue de fournir plusieurs fichiers numériques. Il s'agit en premier lieu de décoder les données et d'en vérifier le taux d'impulsions réfléchies. Pour la mission de Charente-Maritime en 2000, celui-ci avoisinait 94 % pour l'ensemble des bandes scannées (Geodan Geodesie, 2000).

La densité de points doit aussi être vérifiée : pour la même mission, celle obtenue est de 1 point par 3 m² au niveau des bandes de recouvrement, 1 point par 6 m² ailleurs. Elle est plus importante au nadir (la verticale) de l'avion et tend à décroître légèrement de part et d'autre.

La raison probable est que le signal émis à angle de balayage maximal (19°) atteint la surface avec une incidence plus forte. Il se peut alors qu'il soit renvoyé sous un angle ne permettant pas sa réception par le détecteur.

La trajectoire de vol a été ensuite déterminée à partir des données GPS et INS par un logiciel spécialement conçu. Celle-ci a pu être reconstituée avec une grande précision, les écarts type annoncés sur les trois composantes étant seulement de 0.011 m pour X, 0.010 m pour Y et 0.021 m pour Z (Geodan Geodesie, 2000). La position du laser a été interpolée le long de la trajectoire entre les tops du GPS (fréquence 1 Hz).

L'étape suivante du travail constitue ce que l'on nomme les contrôles interne et externe des mesures. Le contrôle interne consiste à analyser la forme et la position des bandes levées et à les ajuster entre elles de manière à minimiser les écarts au niveau des Z estimés. Ainsi, en considérant l'ensemble des zones de recouvrement, la moyenne des écarts sur la composante Z est de 7.85 cm (Geodan Geodesie, 2000). D'autre part, un contrôle externe du même type est effectué en s'appuyant sur les zones de référence levées au sol.

Description des données et produits

Le tableau 5 présente un récapitulatif des produits typiques délivrés par le prestataire.

Deux grandeurs sont mesurées par la mission Lidar : l'altitude et l'intensité. Les appareils récents mesurent en effet non seulement le temps de retour (range) des pulses mais aussi l'intensité de la lumière rétrodiffusée par la cible. Cette dernière équivaut à une luminance.

Sur sol nu, on aura un seul pulse et une seule valeur pour chaque grandeur. Si un objet élevé (arbre, buisson, bouchot) comporte plusieurs altitudes, il y aura en général deux pulses (FP : first pulse, LP : last pulse) à condition que sol et « sursol » soient éloignés de plus d'un demi-mètre d'altitude. Le système mesure donc pour chacun de ces pulses le temps de transit et l'intensité. Signalons que lorsque c'est le cas, les deux points générés par ces deux pulses ne sont pas exactement superposés. Le produit n°2 contient tous les points (X,Y,Z), qu'ils soient au sol ou à un niveau supérieur (appelé sursol), et le produit n°6 contient les mêmes points répartis en deux fichiers (X,Y,Z), l'un de points au sol, l'autre de sursol.

Les points du sol (appelés DTM ou modèle de terrain par rapport aux points du sursol appelés DEM ou élévation) sont isolés dans le produit n°1.

Un autre fichier est confectionné qui ne retient que les points à double pulse, appelés génériquement « végétation » (produit n°4), de forme (X,Y, Z1, Z2).

Les produits n°5 et 8 sont respectivement des fichiers TIN et GRID. Le fichier TIN ne retient que les points principaux du DTM obtenus par une triangulation de Delaunay (Laurentin, 2002). Le fichier GRID maillé est obtenu par moyennage des points du DTM sur une maille de 5 mètres. Il présente donc un aspect fortement lissé. Un fichier ombragé est aussi fourni (Hillshade) pour illustration.

Tableau 5 : Produits issus d'une acquisition Lidar

Product	Description	Projection	Format	How	Remarks
1	Groundpoints (DTM)	Lambert'93	x y z	1 x 1 km blocks ¹⁾	
2	All points (DEM, ground + non-ground points)	Lambert'93	x y z	1 x 1 km blocks	
3	Intensity	Lambert'93	FP: x y Intensity LP: x y Intensity	1 x 1 km blocks	Without z-value
4	Vegetation	Lambert'93	FP-LP: x y z(fp) - z(lp)	1 x 1 km blocks	Vegetation > 0.50 m
5	TIN of DTM	Lambert'93	Arcview		
6	Raw data	Lambert'93	FP: x y z LP: x y z	1 x 1 km blocks	
7	DTM with reduced density	Lambert'93	x y z	Thinned points	Reduction of 20 times
8	Grid of DTM + hillshade	Lambert'93	Arcview	Mesh size 5 metres	
9	Report				

¹⁾ The size of the blocks (here suggested as 1 by 1 km) can be changed.

Le produit n°7 est obtenu par « décimation » du fichier n°1 : autour d'un point de mesure, tous les points présentant une différence d'altitude faible avec le point de départ sont éliminés. On conserve ainsi des vrais points de mesure. En choisissant le seuillage en différence qui convient, on parvient ainsi à réduire la taille d'un facteur 20, c'est à dire une résolution d'environ 10 mètres au lieu de 2.5 mètres initialement. Ce produit, perdant peu de variance, respecte bien les accidents du terrain et se prête aux utilisations demandant moins de finesse spatiale (e.g. la modélisation).

Similairement à l'altitude, l'intensité fait l'objet de deux fichiers (X,Y,I), l'un de sol, l'autre de sursol (produit n°3). L'intensité est une grandeur qui : a) permet, mieux que l'altitude, le repérage immédiat dans l'espace, la texture étant une caractéristique plus intuitive des objets que leur altitude, b) un élément de classification du paysage qui, sans remplacer une autre donnée optique, peut autoriser une première segmentation de l'espace. Elle n'a cependant pas été testée en zone côtière à ce jour.

La densité de points est une donnée relativement peu ajustable car les appareils ont des fréquences fixes. Dans ce cas, à une altitude donnée correspond une certaine densité. La seule manière de varier la densité est de modifier l'altitude, ce qui présente des inconvénients par ailleurs. On prendra garde lors de l'appel d'offre de bien faire appel au prestataire offrant les bonnes caractéristiques en fonction des produits recherchés. On peut citer à titre d'exemple un prestataire allemand qui utilise un appareil de fréquence 80000 Hz qui ne peut fournir une résolution moins forte qu'un mètre (spécialisée en acquisition sur milieu urbain), sauf à dégrader la précision en augmentant fortement l'altitude de vol.

Description des fichiers

Tous les fichiers sont livrés sous forme ascii, organisés en lignes (X,Y,Z...). Ils sont « tuilés », c'est à dire assemblés en briques de quelques km² et accompagnés d'un plan d'assemblage. Pour une meilleure identification, les tuiles portent le nom de leurs coordonnées limites. Ces tuiles évitent de manipuler des fichiers de grande dimension quand on ne travaille que sur des sous-zones. Elles s'assemblent par simple concaténage.

Les données sont fournies dans le système de projection désigné au contrat. Lors des acquisitions de 2002, le Lambert 93 a été choisi (pour plus d'information sur ce nouveau système, consulter <http://www.ign.fr/fr/PI/activites/geodesie/rgf93/index.html>) Cette nouvelle projection conforme, encore peu utilisée, est basée sur le système de référence WGS84 (ellipsoïde IAG-GRS80). Elle est donc directement compatible avec le système GPS. Si l'on souhaite changer de projection (pour par exemple passer en Lambert II étendu) ou dé-projeter pour repasser en coordonnées sphériques, il convient d'utiliser les routines du logiciel « Projection AO/NASCA » disponible sous Arcview à Ifremer DEL/AO, qui comprend Lambert 93, ou encore les routines CIRCE de l'IGN disponibles à l'adresse suivante : <http://www.ign.fr/fr/PI/activites/geodesie/rgf93/OUTILS/index.html>.

A noter que si l'on veut à la fois changer le repère horizontal et le repère vertical (pour passer en IGN69), il convient d'effectuer l'opération en deux temps.

4 Outils et méthodes d'analyse et de validation des données

Extraction et import de sous-zones

Pour l'extraction de sous-zones, le prestataire fournit un logiciel fonctionnant sous Windows appelé AVPIP dont le fichier de description est donné en annexe 2. Il demande en entrée un fichier Arcview de type « shape » de forme polygonale quelconque. Le fichier de sortie est un fichier de lignes ascii. Il peut être importé sous Arcview ou ArcGIS jusqu'à une taille dépassant $1.5 \cdot 10^6$ points.

Sous Arcview, un certain nombre de manipulations peuvent être faites : transformations géométriques, visualisation, interpolations simples, création de TIN, isolignage etc...

Outils de comparaison statistique

Afin d'opérer une analyse de la qualité des données, on doit les comparer à un jeu de levés de terrain considéré comme référence.

Les données Lidar possèdent une densité d'environ 1 point pour 6 m². Lors des acquisitions de dGPS de terrain, on enregistre habituellement des points sur une maille approximative de 5 mètres. Statistiquement, un certain nombre de couples de points peu éloignés peuvent être formés. On vise typiquement un éloignement d'au maximum un mètre. Si le terrain est raisonnablement plat, le bruit topographique induit par cette distance d'un mètre reste négligeable et on peut parler de « co-localisation » des points et comparer leur valeur.

Le logiciel d'analyse géostatistique Isatis 8.1, outre ses fonctions d'analyse de données spatiales et d'interpolation, possède une fonction bien adaptée appelée « migration ». A partir d'un point dans un fichier, celle-ci effectue dans un autre fichier une recherche du point le plus proche situé dans un cercle centré sur le premier. Le rayon de recherche est défini par l'utilisateur.

Ce logiciel possède un grand nombre d'outils statistiques qui permettent de faire ressortir les principales caractéristiques des mesures (tracés d'histogrammes, représentations spatiales des données, diagrammes de corrélation). Ainsi la fonction Exploratory Data Analysis d'Isatis 8.1 offre la possibilité de réaliser une étude géostatistique approfondie de données numériques (représentation graphique, étude variographique). Il présente en outre des fonctions permettant l'étude statistique sur plusieurs jeux de données et leur comparaison (diagramme de corrélation).

Isatis 8.1 possède enfin des fonctions de visualisation variées, aussi bien en 2D qu'en 3D avec un choix vaste de palettes prédéfinies et la possibilité à l'utilisateur de construire sa propre palette.

Confection du modèle numérique de terrain

Différents logiciels possèdent des modules d'interpolation de complexité et d'efficacité très diverses. La caractéristique principale de la donnée Lidar tient dans sa régularité. En effet, l'ensemble du terrain est couvert à une densité quasi-constante, dans l'exemple ci-dessous environ 2.5 mètres. Si l'on recherche à interpoler sur une maille de taille comparable à la densité de la donnée, on pourra utiliser des modèles d'interpolation très classiques tels l'inverse distance, le spline ou autre, chacune de ces méthodes ayant des propriétés de lissage assez différentes. Si en revanche, on cherche à « boucher des trous » (exemple des mares d'estran où le Lidar ne réfléchit pas de signal) ou encore à travailler à une taille de maille devenant plus petite que la densité moyenne, on pourra trouver intérêt aux méthodes géostatistiques, notamment le krigeage.

On pourra utilement consulter Sanchez (1999) ainsi que Barreau (2000).

5 Exemple de résultats sur l'anse de l'Aiguillon, Charente-Maritime

Présentation de la zone d'étude

L'Anse de l'Aiguillon est située à la limite des départements de Charente Maritime et de Vendée. Elle ferme au nord la mer des Pertuis Charentais (figure 13 gauche).

De la pointe Saint-Clément à celle de l'Aiguillon, l'anse couvre une superficie de l'ordre de 40 km² (contour pointillé). Le zéro des cartes marines est figuré en rouge sur la figure 13 droite.

La topographie de l'estran est dans l'ensemble peu prononcée : elle décroît en pente douce au fur et à mesure que l'on s'éloigne du trait de côte. Les pentes sont faibles sur la slikke et le schorre, toujours inférieures à 2 % sur les premières et à 1 % sur les seconds, excepté au bord

des chenaux et ruissons. La végétation du schorre (Guillaumont, 1991) se réduit à quelques touffes pionnières de *Spartina sp.* au départ puis devient plus dense et plus variée avec l'élévation du sol.

L'estran constitue un milieu difficilement accessible et difficile à lever par voie classique : seule la partie basse est navigable à marée haute et les mesures bathymétriques sont impossibles sur la haute slikke comme sur le schorre du fait de la faible profondeur d'eau.

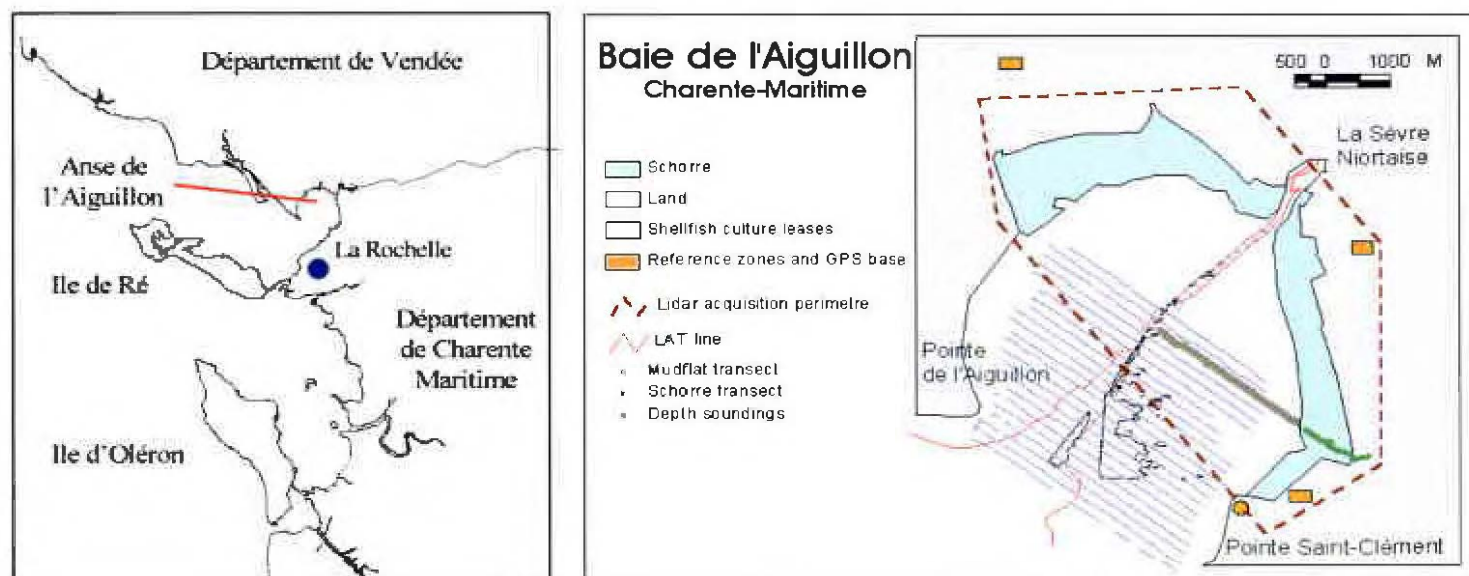


Figure 13 : A gauche, plan de situation de l'anse de l'Aiguillon, à droite vue détaillée du site et des données disponibles

Les données disponibles à des fins de comparaison sont de deux types :

- Des levés de terrain ont été effectués par le service maritime de la DDE au GPS différentiel double fréquence. Un transect (en gris et vert sur la figure 13) d'environ 3 km allant du chenal de la Sèvre jusqu'aux digues de haut estran a été réalisé en enregistrant une mesure tous les mètres. Ce fichier contient donc environ 3000 points. Il servira de référence par la suite. La précision absolue de ces mesures est estimée à mieux que 3 cm.
- Une mission bathymétrique classique au 1/20000 (en bleu sur la figure 13) a été menée entre novembre 1999 et janvier 2000 au moyen d'un sondeur mono-faisceau donnant une mesure tous les 20 à 30 mètres le long des profils. Ces profils sont linéaires et espacés de 200 mètres. Les profondeurs mesurées sont déterminées par rapport au zéro hydrographique et leur précision est estimée à 10 cm. Comme on le voit sur la figure, ces sondages laissent non couverte une large part de l'anse.

Validation des données sur sol nu

Le profil de terrain figuré en gris sur la figure ci-dessus couvre la zone de slikke, c'est à dire de vase nue. Le principe de validation a été décrit ci-dessus en 4.2. En utilisant une migration de 0.5 mètre, on parvient à former 283 couples de points dont l'un est une mesure Lidar, l'autre un levé au sol. Quand on réduit cette valeur à 0.2 mètres, le nombre de couples passe à 50 seulement.

Les statistiques sont données par le tableau 6 et la figure 14. On y constate les résultats suivants :

- Le passage de 0.5 à 0.2 mètres améliore les performances, le biais restant quasi-constant et proche de zéro, l'écart-type diminuant de 10 % pour passer à 10 cm.
- La valeur minimum de l'écart ne change pas (-0,23), elle est probablement due à la conjugaison de trois phénomènes : une lecture trop basse du Lidar, une lecture haute du dGPS, un léger accident topographique survenant entre les deux points. Un tel accident ne peut que rester très modéré sur une vasière étant donné la distance (aux erreurs de planimétrie près) de 20 cm séparant les deux points.
- En revanche, la valeur maximum passe de 0.61 m à 0.22 m. On peut l'expliquer plus que précédemment par un accident topographique : il est probable que le point du sol au Lidar se trouvait dans une légère dépression. A noter sur les figures 14 a et b que pour la migration de 50 cm la valeur 0.61 m est une valeur unique, très isolée hors de la gaussienne des différences, et située dans les niveaux bas de l'estran. Il peut s'agir d'un objet isolé sur la vasière.

On montre en figure 14b le diagramme de corrélation entre mesures Lidar et mesures au sol. Les points présentant le plus grand écart sont notés en rouge. La localisation sur le terrain de ces points le long du transect apparaît sur la figure 14c. Il ne semble pas y avoir de positionnement particulier de ces points, qu'on aurait pu en toute logique attendre sur les rives du chenal de la Sèvre (là où la pente du terrain peut atteindre 10 à 20 %), chenal situé dans la partie nord-ouest du transect.

La seconde statistique, qui comporte 50 points, peut être considérée comme valide. Elle montre que par rapport à la référence terrain, l'écart-type de la mesure Lidar est de 10 cm. Ceci est conforme à la précision annoncée par le prestataire qui a réalisé l'acquisition.

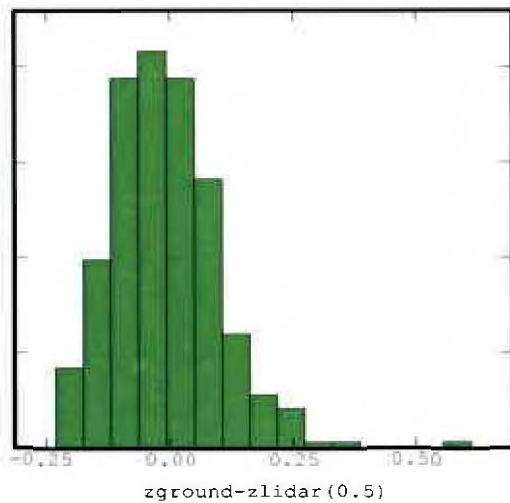
Tableau 6 : Statistiques des comparaisons entre Lidar, levés dGPS (ground) et sondages bathymétriques (soundings). La distance de co-localisation est indiquée entre parenthèses.

Variable	Count	Minimum	Maximum	Mean	Std. Dev.
Z _{ground} -Z _{lidar} (0.5m)	283	-0.23	0.61	- 0.01	0.11
Z _{ground} -Z _{lidar} (0.2m)	50	-0.23	0.22	- 0.006	0.10
Z _{ground} -Z _{sounding} (4 m)	71	-0.19	0.14	0.05	0.05
Z _{lidar} -Z _{sounding} (1 m)	341	-0.45	0.50	0.02	0.16

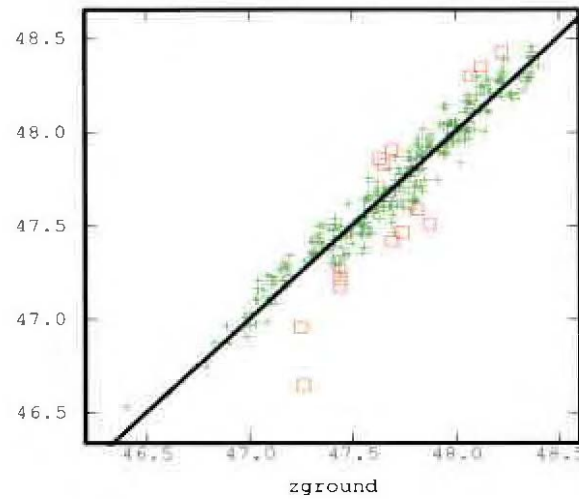
En outre, on a comparé les mesures de terrain aux sondes dans un rayon de 4 mètres. Un biais, de 5 cm apparaît, ce qui tendrait à montrer que le sondeur mesure systématiquement trop bas. L'écart type reste faible, malgré la distance de 4 mètres -qui devrait plutôt le faire augmenter...

Enfin, si on compare Lidar et sondes dans un rayon d'un mètre, la statistique de 471 couples est conforme aux attentes : la somme quadratique des écarts cumulés des lignes 2 et 3 est bien environ égale à celle de la 4^{ème}.

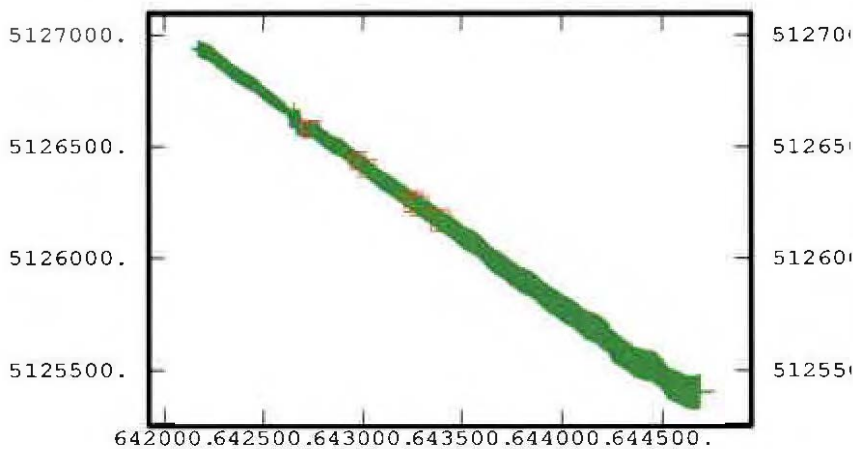
Notons que la précision atteinte ici est compatible avec les données de la littérature (Lemmens, 1997). En annexe 1 sont données les précisions Lidar d'après Huising (1998) sur différents types de terrain.



(a)



(b)



(c)

Figure 14 :

**a) histogramme de $Z_{ground} - Z_{lidar}$,
b) diagramme de corrélation de $Z_{ground} - Z_{lidar}$. (les points mal corrélés apparaissent en rouge)
c) position de ces points sur le transect.**

Considérations en zone de schorre

La validation en zone de schorre a été effectuée grâce à l'exploitation conjuguée d'une image Spot acquise le même jour. On trouvera le détail de ses traitements dans Barreau (2000).. En tout état de cause, les mesures dGPS reflètent le sol vrai, tandis que celles du Lidar reflètent une altitude inconnue située entre le sol et le sommet de la végétation. La tâche d'insolation étant en effet de 25 à 30 cm de diamètre, suivant le type de couvert plus ou moins épars, l'arrière du pulse est généré par le sol, l'avant par les tiges et feuilles. Ces deux parties, trop proches, ne sont pas distinguables au traitement et seule la partie avant du pulse (donc a priori le sommet de la végétation) déclenche le seuillage. Il peut aussi arriver que des zones nues de petite taille, fréquentes en zone de schorre (sauf peut-être sur la très dense Obione) renvoient une valeur « sol ».

Il n'a pas été possible de tirer une conclusion globale, c'est à dire de donner un écart-type de détection du sol, à moins de disposer d'une classification du schorre extrêmement fiable et détaillée. On peut alors au mieux estimer le biais induit par la végétation sur chaque zone et le retirer à chaque valeur Lidar mesurée. Ceci sera satisfaisant sur des massifs denses (tel l'Obione par exemple, de sommet à 30 cm environ au-dessus du sol) mais très approché sur les graminées Agropiron. Sur des milieux à Aster haute mais clairsemée, on pourrait ne garder que les points les plus bas (donc supposés au sol) et éliminer les autres.

Confection d'un MNT mixte Lidar/sondes sur sous-zone

L'objectif est ici de confectionner un modèle mixte, à une résolution délibérément choisie à 5 mètres, en utilisant de manière conjointe le fichier Lidar épuré et les sondes bathymétriques sur les zones de chenal (où le Lidar ne voit au mieux que la surface). Une maille de 5 mètres contient environ 4 points Lidar.

Deux solutions sont alors possibles au plan de l'interpolation :

a) ou bien du fait de cette surabondance, on utilise tous les points que l'on moyenne sur chaque maille. C'est la méthode la plus immédiate et la plus simple, mais l'effet de lissage est très fort.

b) ou bien on s'attache à ne retenir que les points « marquants » du fichier (au sens du produit n°7 du tableau 5). A cette fin, on supprime par exemple tous les points situés à moins de 2 mètres les uns des autres dénotant une différence d'altitude faible. On peut ainsi obtenir une réduction du fichier à environ 1 point par maille de 5 mètres. L'interpolation au plus proche voisin donnera alors un résultat meilleur que la première méthode.

Pour confectionner un modèle global de la zone comprenant la zone de chenal en eau où le Lidar ne mesure que la surface, il a fallu éliminer ces données Lidar et compléter le fichier avec les données de levés bathymétriques. Le contourage de cette zone de chenal peut être opéré de deux manières : a) par seuillage automatique si la surface de l'eau est plane (site réduit et acquisition de durée courte, ce qui est rarement le cas), b) interactivement sur un fichier maillé confectionné par interpolation rapide.

Le fichier global ainsi constitué se trouve largement irrégulier : d'une part une résolution isotrope de 5 mètres pour le Lidar, d'autre part une résolution largement anisotrope de 10 mètres et 200 mètres dans les deux directions orthogonales de sondage pour le fichier de sondes. Le krigeage a été préféré aux autres interpolateurs (Sanchez, 1999) car il permet plus facilement de traiter un tel cas et réagit bien dans les zones de « trous ».

On se reportera à Barreau (2000) et à Populus (2001) pour l'étude géostatistique sur ces données.

La figure 15 montre le résultat de l'interpolation sur une sous-zone de 1.25 km de côté située sur le chenal de la Sèvre. A gauche, les données de la vasière sont du Lidar, celles du chenal des sondes (en-dessous de la valeur 43.46, niveau de l'eau en WGS84). Toutes sont interpolées sur une maille à 5 mètres, avec une rampe de couleurs de pas 0.2 mètres sur l'intervalle 42-48 mètres, et des isolignes espacées de 0.5 mètres. A droite, les données sont des sondes, interpolées sur une maille de 20 mètres, avec les mêmes données de visualisation.

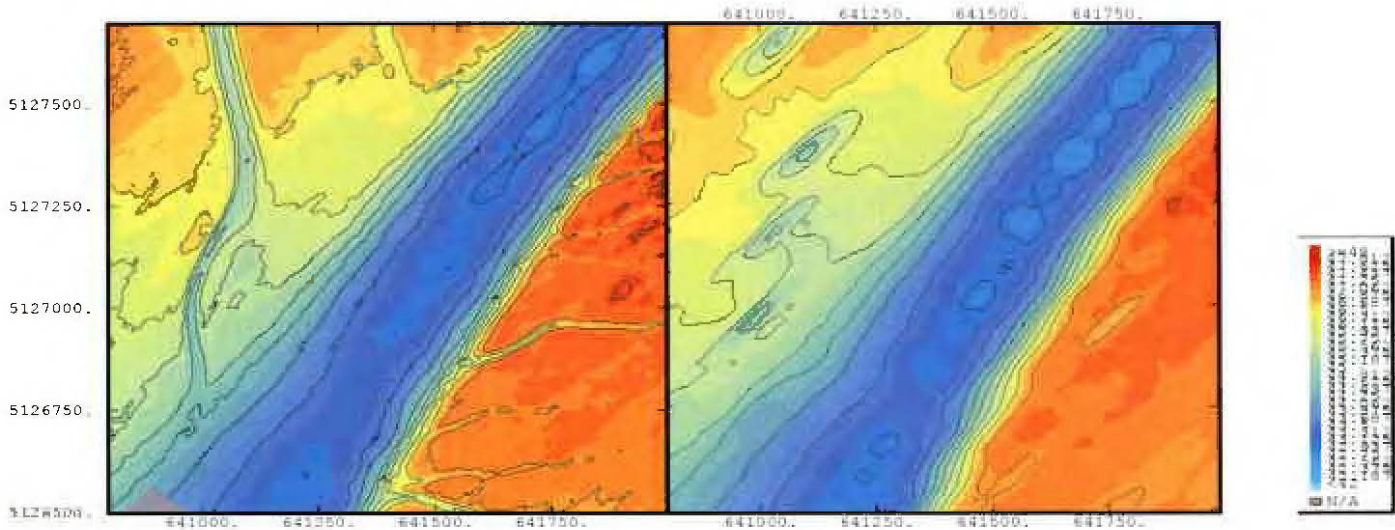


Figure 15 : A gauche, MNT mixte Lidar-sondes à maille de 5 mètres, à droite MNT de sondes seules à maille de 20 mètres.

On constate l'extrême richesse de détail géomorphologique apportée par le Lidar. A droite, les chenaux ne sont qu'esquissés par une sonde plus basse ici ou là, créant des effets de trous. A noter qu'en zone de chenal, avec des données de sondes, on constate une plus grande stabilité des isolignes obtenues par krigeage sur une maille de 5 mètres que sur une maille 20 mètres. Sur le côté droit du chenal, le MNT Lidar montre un grand nombre de micro-chenaux d'écoulement, totalement invisibles sur la vue de droite.

Confection d'un MNT global

La figure 16 présente le MNT global de la zone, obtenu par interpolation sur une maille de 5 mètres, en n'utilisant que les valeurs Lidar. On remarque que la surface de l'eau du chenal n'est pas plane, la partie nord ayant été acquise avant la basse mer.

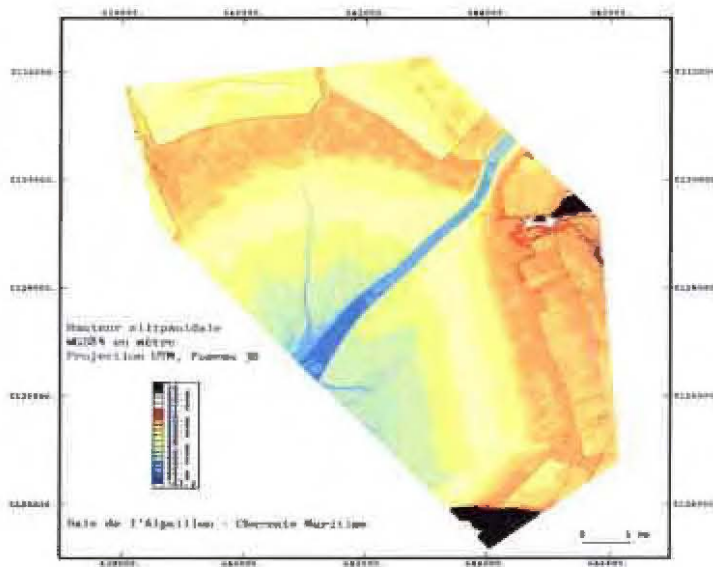


Figure 16 : MNT global de la zone à maille de 5 mètres.

Confection de sous-modèles à maille fine

Afin d'illustrer la finesse de la donnée, la pleine résolution est utilisée pour confectionner des MNT locaux à résolution d'un mètre. On rappelle que la densité de points est en zone courante de 2.5 mètres environ, en zone de recouvrement entre bandes environ deux fois plus forte. Il n'est donc pas abusif de rechercher un MNT à maille d'un mètre. Le krigeage est encore utilisé pour sa robustesse par rapport aux interpolateurs courants.

Deux sous-zones sont ainsi traitées, l'une au nord-ouest le long du chenal de Luçon et de la digue du Maroc, de 500 mètres de largeur, l'autre au sud-est le long du chenal du Curé, d'un kilomètre de largeur. Sur les figures 17 et 18, la rampe de couleur illustre un pas en altitude de 20 cm.

Sur le MNT de la figure 17 gauche, on perçoit distinctement les étagements de végétation en place, ainsi que le montre la photo de terrain. L'ancienne digue à gauche, qui se dirige vers la vanne (visée depuis la flèche verte), est approximativement 60 cm au-dessus du schorre environnant. On voit sa végétation de graminées plus élevée soulignée par une ligne brune à gauche de la flèche verte. Le linéament orange représente le lit d'Obione sillonné par un micro-chenal de drainage. Entre les deux, une banquette de quelques mètres d'Agropyron apparaît en orange. A gauche et au nord du MNT, les digues bordent des champs poldérisés dont les tons verts dénotent une altitude inférieure à celle de la zone marine.

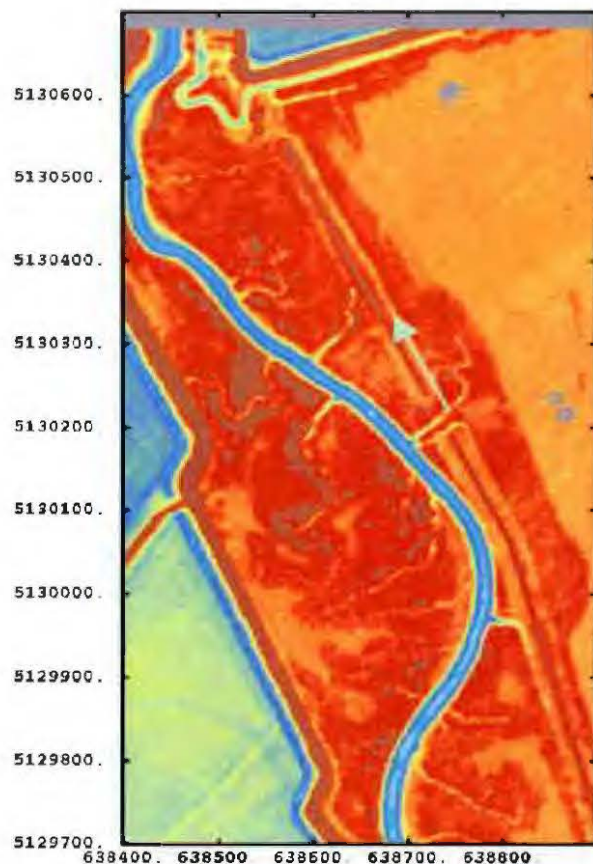


Figure 17 : A gauche le MNT à maille de 1 mètre autour du chenal de Luçon, à droite la vue de terrain correspondante (visée depuis la flèche verte)

Il convient de noter qu'aucun bruit n'apparaît sur ce MNT, dont la résolution en altitude n'est que deux fois supérieure (20 cm) à la précision des données (10 cm).

Sur la figure 18, à gauche apparaît le MNT de la zone du Curé à maille d'un mètre, à droite une ortho-photographie de l'IGN datant du 1^{er} juillet 1999, soit une année auparavant. Le modèle révèle mieux que la photo le réseau de chenaux. En revanche et bien évidemment, il est moins riche sur les zones à topographie peu marquée, comme la zone de chaumes très brillants en haut à droite (Agropyron moissonné depuis peu).

Le chenal en bras mort en bas à droite, dont le fond est donné pour 49.5 mètres (jaune /orange) chemine entre des rives couvertes de graminées qui ressortent très nettement de couleur rouge brune et dont l'altitude est de 50.4 mètres. Sur la photo, ces graminées forment un liseré de couleur verte plus clair le long des rives.

Les autres formations végétales ne donnent pas de signal topographique particulier, excepté à la limite basse du schorre où la transition vers la vasière nue est bien marquée par la couleur jaune.

Les zones grises sont des mares d'eau résiduelle de large taille, vides de données Lidar, où en conséquence l'interpolateur n'a pu fonctionner faute de données. Dans la pratique, il conviendrait de lever quelques points sur de telles zones afin que l'interpolation soit complète ou encore de les créer artificiellement. Leur couleur brillante sur la photo de juillet montre qu'elles sont sèches à cette époque de morte-eau.

A la différence du précédent, ce MNT montre quelques stries orientées perpendiculairement à l'axe du vol, mais aussi parallèlement à la ligne de grande pente du schorre. Ces stries évoquent un bruit et risquent de donner des isolignes perturbées. On peut dans ce cas agir sur le modèle de krigeage en jouant sur ce qui s'appelle l'effet de « pépite ».

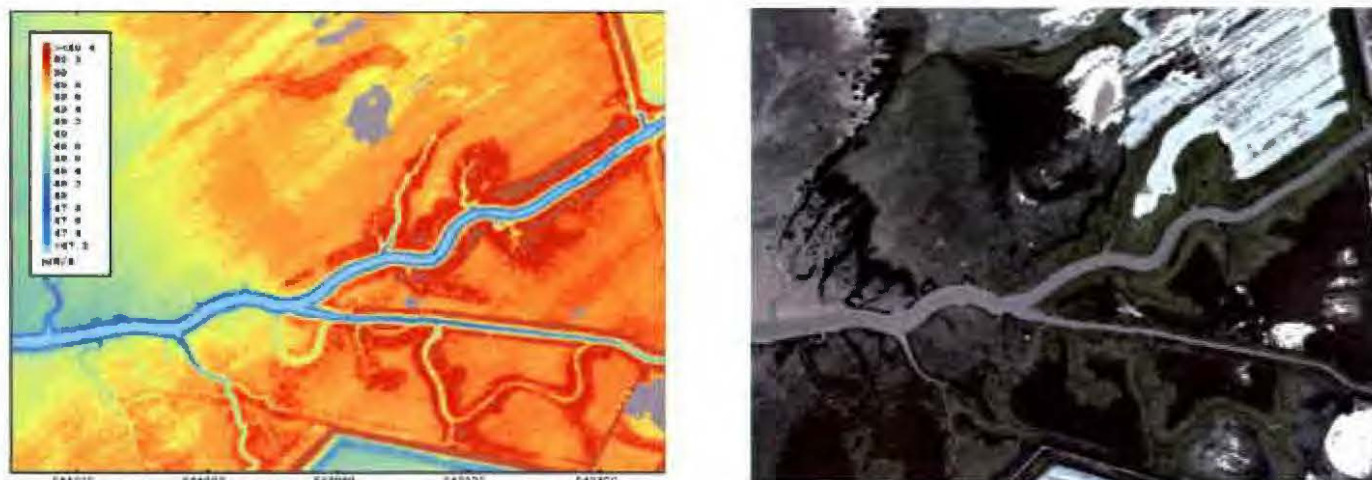


Figure 18 : À gauche le MNT de la zone du chenal du Curé, à droite l'ortho-photographie IGN du 1^{er} juillet 1999

6 Conclusion et perspectives

La technique Lidar s'avère très prometteuse, malgré les contraintes spécifiques de la zone côtière où les fenêtres de basse mer et de météo adéquate sont réduites (ceci est le cas pour toute méthode utilisant la lumière visible). Une fois ces conditions réalisées, le rythme d'acquisition est très rapide, typiquement de 40 à 50 km² par jour, ceci étant largement fonction de la longueur des axes de vol, eux-mêmes résultant du caractère plus ou moins indenté des sites.

Les prestataires délivrent aujourd'hui des données brutes de haute qualité, ainsi que certains traitements types permettant une première visualisation. Cependant les données brutes doivent faire l'objet de traitements ad hoc pour les applications visées, en fonction des échelles recherchées. Notamment, l'introduction de données dans les modèles hydrodynamiques nécessite que les fichiers soient largement élagués, de manière à ne garder que les points significatifs, sous un format de sortie adéquat. Les applications très fines impliquent l'utilisation d'interpolateurs, le krigeage restant une méthode très puissante. En outre, les systèmes de projection peuvent varier d'un utilisateur à l'autre, ce qui implique des transformations aujourd'hui fiables mais fastidieuses.

Les précisions obtenues sur terrain nu sont excellentes (environ 10 cm rms), tandis que les végétations basses (inférieures au demi-mètre) restent encore sous le niveau de détection. Sur les schorres, il faudra donc s'arranger pour obtenir un nombre minimum de vrais points de sol et interpoler entre eux. La délinéation des schorres, requérant jusqu'ici une donnée exogène, pourra dans l'avenir être exécutée avec les données d'intensité du Lidar (dans la bande IR de 1064 nm).

On utilise en général le « dernier pulse » qui renvoie le signal du sol. Le premier pulse peut aussi être utilisé pour détecter tout objet naturel ou anthropique s'élevant à plus d'un mètre du sol, comme par exemple sur estran, des bouchots et certaines tables ostréicoles. En périphérie terrestre, on pourra reconnaître végétation et bâtiments, pour des applications paysagères.

En matière de coûts, on trouvera une argumentation en faveur de la photogrammétrie d'estran dans Laurentin (2002), cependant le choix d'une méthode doit être affiné au cas par cas en fonction de la configuration des sites.

Références

- Barreau, G.**, 2000. Apport de l'altimétrie par laser aéroporté à la cartographie des estrans.
- Geodan-Geodesie**, 2000. MNT de la région de l'anse de l'Aiguillon. Rapport de prestation, Ifremer DEL/AO.
- Guillaumont, B.**, 1991. Utilisation de l'imagerie satellitaire pour les comparaisons spatiales et temporelles en zones intertidales, *Estuaries and Coasts : Spatial and Temporal Intercomparisons*, ECSA 19 Symposium, Elliot and Ducrotoy Eds, Olsen and Olsen, 63-68.
- Huising, E. J., Gomes Pereira, L. M.**, 1998. Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53, 245-261.
- Krabill, W. B.**, 1984, Airborne laser topographic mapping results, *PE&RS*, vol. 50, num. 6, 685-694, 1984.
- Lemmens, J. P. M.**, 1997. Accurate height information from airborne laser altimetry, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 222-234.
- Laurentin, A.**, 2002. Etude de faisabilité de topographie d'estran par photogrammétrie, Mémoire Ing. Géogr., Mastère Photogrammétrie, IGN, Ecole Natle. Sci. Géogr. ; *Rapport Ifremer/DEL, Serv. DEL/AO (RST.DEL/AO/02.05/Brest)* : 56p.
- Measures, R. M.**, 1997. Laser remote sensing : present status and future prospects, *SPIE*, vol. 305, 2-8.
- Populus, J., et al.** 2001. Assessment of the Lidar topographic technique over a coastal area. CoastGIS'01, Second International Symposium on GIS and Computer Mapping for Coastal Zone Management, Halifax, June 18-20, 2001.
- Ritchie, J. C.**, 1995. Airborne laser altimeter measurements of landscape topography, *Remote Sensing of Environment*, vol. 53, num. 2, 91-96.
- Samberg, A.**, 1997. What laser scanning can do to day : current techniques, *EARSel Advances in Remote Sensing Year Book*, vol. 5, 114-119.
- Sanchez, J.**, 1999. Elaboration et étude critique de modèles numériques de terrain bathymétriques. *Mémoire de l'Ecole supérieure de géomètres et topographes*, Le Mans, France, 62 p.
- Van De Kraats, E.**, 1999. Airborne laser scanning : an operational remote sensing technique for digital elevation mapping in coastal areas, *Geomatics and coastal environment*, Populus and Loubersac (eds), Actes de colloques, *Editions de l'Ifremer*, Brest, France, p 149-158.
- <http://www.ign.fr/fr/PI/activites/geodesie/rgf93/index.htm>
- <http://www.ign.fr/fr/PI/activites/geodesie/rgf93/OUTILS/index.html>
- http://pro.thalesnavigation.com/fr/pro/scripts/techno_gps/techno_gps dgps.asp

Annexe 1 : Erreurs affectant la mesure Lidar (Huising, 1998)

Table 1. Quantification of systematic and random errors based on theoretical considerations.

Error source	Terrain Type					
	Flat paved	Flat barren	Flat grass and scrubs	Hilly paved	Hilly barren	Hilly grass and scrubs
Order of systematic errors						
Detector bias and gain	cm	cm	cm	cm	cm	cm
Laser pulse delay	cm	cm	cm	cm	cm	cm
INS misalignment	cm to dm	cm to dm	cm to dm	dm to m	dm to m	dm to m
INS gyro drift	cm	cm	cm	dm	dm	dm
GPS base-line error (for base lines <=20 km)	cm	cm	cm	cm	cm	cm
GPS tropospheric delays	cm to dm	cm to dm	cm to dm	cm to dm	cm to dm	cm to dm
Terrain slope	0	0	0	cm	cm	cm
Vegetation	0	0	dm to m	0	0	dm to m
Positional integration	cm to dm	cm to dm	cm to dm	cm to dm	cm to dm	cm to dm
Overall (cm)	5-20	5-20	20-200	5-20	5-20	20-200
Order of random errors						
Pulse detection	dm	dm	dm	dm	dm	dm
Pointing jitter	0	0	0	dm to m	dm to m	dm to m
INS	not known					
GPS	cm	cm	cm	cm	cm	cm
Terrain roughness	0	cm	cm to dm	0	cm	cm to dm
Reflectivity	cm to dm	cm to dm	cm to dm	cm to dm	cm to dm	cm to dm
Overall (cm)	10-20	10-50	10-50	20-200	20-200	20-200

Annexe 2 : La routine d'extraction AVPIP

Shapefile: Select the Arcview shapefile to cut the point data with. With the "File info" button information on the shapefile is shown with the "View" button the shape is depicted on a screen.

Invoerbestand puntdata (XYZ): Select the point file to cut. x, y, z should be separated by space.

Uitvoerbestand (statistiek): Select an outputfile. In this file the statistics of the cut-action will be saved.

Winding Mod: None: With this mode all data within the polygons of the shapefile are saved.
Auto: With this mode all data within the polygons of the shapefile are saved. When there is overlap between polygons the overlapping area is considered to be a hole and data in this area are not written to the pipfile.

Shape: With this mode all points outside the polygons of the shapefile are saved.

By pushing **start** the program will make output. It makes the following files:

In the directory of the point file it makes *.pi1, which contains all points within the polygons, *.pi2 all containing points outside the polygons . The * is the same name as the input point file.

The output file selected contains the statistics of the process, so it contains the number of points within a polygon, the average value of the points within the polygon, the maximum, minimum and standard deviation of the points within the polygon.

*Impression : Service TMSI/DM/RIC
IFREMER – Centre de Brest
BP 70 – 29280 Plouzané
Tél. : 02 98 22 43 53*