

Apport de l'altimétrie par laser aéroporté à la cartographie des estrans : expérimentation de l'anse de l'Aiguillon

Gérald Barreau - Jacques Populus (Ifremer)
Jacques Fazilleau (DDE 17)

L'altimétrie par laser aéroporté combine et intègre des capteurs de haute technologie : des récepteurs GPS, un système de navigation inertielle et un télémètre laser pour générer des données altimétriques. Cette technique aujourd'hui pleinement opérationnelle constitue un outil idéal pour une cartographie altimétrique rapide et de grande précision de zones difficilement accessibles par voie classique, notamment les zones littorales.

Cet article décrit une expérimentation effectuée par l'Ifremer sur le site de l'anse de l'Aiguillon (Charente-Maritime). Une évaluation des données est faite par comparaison avec des sondes bathymétriques. La dégradation de la précision en zone d'herbu est quantifiée. Un modèle numérique de terrain à maille fine est produit, avec une précision d'environ 15 cm.

Les zones littorales, constituées entre autres des estrans et marais, sont longtemps restées en dehors des enjeux économiques. Aujourd'hui, elles sont au cœur des problèmes d'aménagement du territoire national. Les enjeux actuels sont multiples et diversifiés. Il s'agit, par exemple, d'assurer l'entretien des ouvrages côtiers et des voies d'accès, de veiller au bon développement des parcs ostréicoles et conchylicoles. Il importe aussi de suivre les changements morphologiques du littoral pour proposer des solutions d'aménagement adaptées. Or, cette gestion contrôlée de l'espace littoral nécessite la collecte d'un grand nombre d'informations sur le milieu, dont certaines font largement défaut au

niveau des estrans. La topographie en est un exemple manifeste.

Les techniques conventionnelles telles que la photogrammétrie, la tachymétrie, les relevés terrain par GPS permettent difficilement d'acquérir une information altimétrique précise et complète. D'une part, la photogrammétrie est fortement contrainte par la présence de végétation au sol et la déclivité du terrain. D'autre part, les mesures effectuées sur le terrain ne peuvent l'être que ponctuellement. Quant aux levés bathymétriques, ils sont inopérants sur la partie haute des estrans en raison de la faible profondeur d'eau à pleine mer. Enfin, la mise en œuvre de toutes ces techniques est gourmande en temps et en ressources.

Avec le développement du laser se sont ouvertes de nouvelles possibilités pour une meilleure caractérisation topographique du milieu. La technique d'altimétrie par laser aéroporté est en effet passée du stade expérimental à une large utilisation aujourd'hui. L'intégration et le couplage du laser avec des capteurs de positionnement de haute technologie fournit désormais un outil idéal pour une cartographie altimétrique rapide et de grande précision, quelle que soit la nature de la surface étudiée.

Cet article a pour objet de rendre compte d'une expérimentation menée sur le site de l'anse de l'Aiguillon, en Charente-Maritime. Le principe et les caractéristiques de l'altimétrie par laser aéroporté sont brièvement rappelés. Puis sont exposés la mise en œuvre de la technique sur le site pilote, l'exploitation des données altimétriques, notamment le travail d'évaluation de la précision des mesures selon les configurations du sol, puis la conception d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT).

L'altimétrie par laser aéroporté

Principe et technique

L'altimétrie par laser aéroporté est une nouvelle technique d'acquisition de données altimétriques en 3D. Son principe est simple : il s'agit de mesurer la distance qui sépare l'avion de la surface étudiée. La manière la plus communément utilisée actuellement est de mesurer le temps d'aller-retour d'une impulsion laser. Une autre,

plus rare, consiste à déterminer le décalage de phase entre le signal laser incident et le signal laser reçu [LEM97, BOT98, HUI97].

Les systèmes laser aéroportés développés aujourd'hui combinent la technologie laser avec celle des capteurs de haute technologie (figure 1).

Un télémètre laser balaye le signal proche-infrarouge en direction de la surface et assure la mesure de distance entre l'avion et la cible. La largeur de fauchée couverte est fonction de l'inclinaison du miroir réfléchissant et de l'altitude de vol.

Ce système à balayage laser est couplé d'une part à un système de positionnement GPS. Ce dernier travaille en mode différentiel avec une station au sol et détermine précisément le positionnement absolu de la plate-forme instrumentale tout au long de la télémessure.

D'autre part, une centrale de navigation inertielle (INS) mesure les accélérations et changements d'attitude du laser occasionnés par les mouvements de l'avion (roulis, lacet, tangage). L'INS procure aussi des informations de position précises à court terme lorsque le récepteur GPS est indisponible (nombre de satellites en visibilité insuffisant, interférences électromagnétiques, phénomènes de multitrajet). Le couplage GPS/INS assure ainsi une connaissance très précise de la trajectoire de l'avion, de la direction de visée et de l'attitude du laser [KRA99].



Figure 1 : Schéma d'un dispositif d'altimétrie par laser aéroporté



Figure 2 : Le site pilote : l'anse de l'Aiguillon (source scan25 IGN)

Finalement, ce système offre la possibilité de disposer en temps quasi-réel de mesures directement géoréférencées, dont la précision annoncée est décimétrique pour les coordonnées planaires, centimétrique pour la cote altimétrique [HUI98].

Caractéristiques principales

Comparée aux techniques plus conventionnelles (photogrammétrie, mesures au sol), l'altimétrie par laser aéroporté se caractérise par :

- sa capacité à fonctionner de jour comme de nuit,
- le fort pouvoir de pénétration de la lumière laser. Il est ainsi possible de mesurer l'élévation du sol en zones inaccessibles, comme des zones forestières par exemple,
- sa rapidité de mise en œuvre puisque le travail terrain se résume à l'installation d'une station GPS pivot à proximité de la zone d'étude,
- la rapidité d'acquisition et de traitement des données,
- la grande précision des mesures (dm en X et Y, cm en Z),
- la diversité des informations accessibles (hauteur, volume, radiométrie) [AXE99].

L'atmosphère, notamment la présence de nuages bas, perturbe le temps de propagation du signal, occasionnant des erreurs dans l'estimation des distances qui peuvent atteindre

plusieurs centimètres. Les caractéristiques de surface (rugosité, pente, couverture végétale) affectent également la précision des mesures en modifiant la forme et l'intensité du signal laser. La technique souffre en outre des dérives instrumentales (imprécision de pointage du miroir du télémètre, dérive du GPS et de l'INS, instabilité du détecteur).

Enfin, le signal écho recueilli est complexe car la réflexion de la lumière se fait sur le premier obstacle rencontré. Ce peut être le sol ou bien le sommet de la végétation. S'il est possible de trier l'information dans le cas d'une zone forestière en différenciant les échos, en présence d'une végétation herbue non arbustive, la technique est peu discriminante. Il s'avère alors nécessaire de s'appuyer sur des informations supplémentaires (la réflectance par exemple) pour parvenir à extraire le bruit du signal et concevoir un MNT de qualité [LEM97].

L'expérimentation de l'anse de l'Aiguillon

Présentation du site

L'anse de l'Aiguillon est une région du littoral atlantique située au nord de la Rochelle, à la limite entre les départements de la Vendée et de la Charente Maritime. Réceptacle des eaux de la Sèvre Niortaise, elle couvre une superficie de l'ordre de 40 km² (figure 2). L'espace compris entre le trait de côte

Baie de l'Aiguillon Charente-Maritime

-  Schorre
-  Land
-  Shellfish culture leases
-  Reference zones and GPS base
-  Lidar acquisition perimeter
-  LAT line
-  Mudflat transect
-  Schorre transect
-  Depth soundings

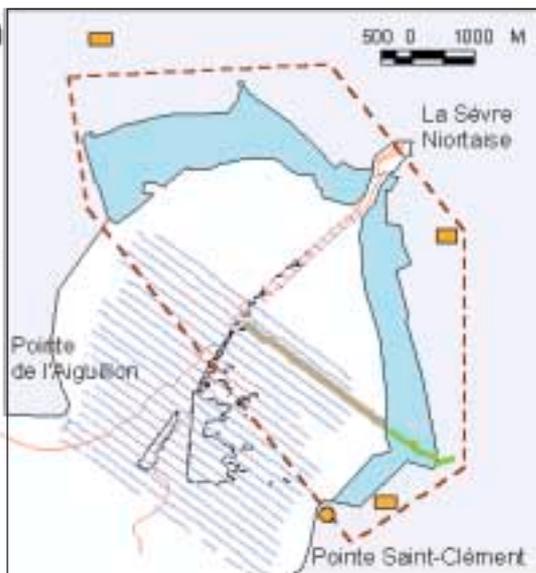


Figure 4 : vue synthétique du site et des données disponibles

et le zéro hydrographique, autrement dit entre les niveaux de plus basse et de plus haute mer, constitue la zone intertidale ou estran. Il s'agit d'un milieu dynamique car soumis au rythme des marées. La topographie y est peu prononcée (pentes inférieures à 2%), excepté au bord des chenaux.

La partie la plus basse de l'estran est uniformément recouverte de vase (slikke, figure 3). Inondée à marée haute, elle est le siège d'activités conchylicoles. En se rapprochant de la côte, le terrain s'élève et s'assèche pour former l'herbu (ou schorre), recouvert à pleine mer. On y trouve une mosaïque d'espèces végétales, plus ou moins denses et élevées, dont la répartition s'établit selon les paramètres physiques du milieu (granulométrie, teneur en eau, salinité). Le schorre est pour cela difficile d'ac-

cès et se prête mal aux mesures altimétriques par voie classique.

Les informations déjà disponibles

Le site de l'anse de l'Aiguillon a fait l'objet de plusieurs études et certaines informations sont déjà disponibles, notamment des levés bathymétriques. Ils ont été réalisés par la DDE de Charente Maritime à l'aide d'un sondeur mono-faisceau et couvrent toute la partie navigable de l'estran (figure 4). Les mesures de profondeur d'eau suivent des profils espacés chacun de 200 mètres, avec un point de mesure tous les 20-30 mètres environ. La précision de mesure est estimée à 10 centimètres.

Par ailleurs, une scène Spot4 a été acquise le 5 mai 2000 par marée basse (figure 5). Elle couvre le site dans les canaux visible, proche-infra-

rouge et moyen infrarouge, avec une résolution de 10 mètres au sol.

L'acquisition des données altimétriques

La saisie des données a été confiée à Geodan Geodesie, entreprise néerlandaise qui utilise le système aéroporté ALTM1020. Une veille météorologique a été menée en parallèle par l'Ifremer et le prestataire pour déterminer le créneau le plus favorable à l'expérimentation. Il s'agissait d'opérer à marée basse de manière à couvrir le maximum d'estran, pendant les fortes marées et avec un plafond nuageux plus haut que l'altitude de vol, soit 700 mètres environ. Le levé aérien a ainsi eu lieu le 5 mai 2000. Le coefficient de marée était de 104 et l'opération a débuté le matin, 1h30mn avant la marée basse. Le plan de vol a été établi de manière à survoler d'abord la partie haute de l'estran puis progresser vers le large en suivant le recul de l'eau. Près de 2h30mn de vol ont été nécessaires pour couvrir les 40 km² de l'estran de l'Aiguillon. Au total, 21 bandes présentant un recouvrement adjacent avec leur voisine de 40% ont été levées. Une équipe de l'Ifremer s'est chargée d'installer sur le promontoire de la pointe Saint-Clément, une station GPS permettant de travailler en mode différentiel avec le récepteur GPS embarqué. Des levés géodésiques de référence, indispensables pour le géo-référencement des mesures laser, avaient été effectués au préalable sur trois zones de contrôle en périphérie du site pilote. Une fois les données collectées, Geodan Geodesie a procédé à divers traitements (décodage des mesures laser,



Figures 3 : Vues du site pilote de l'anse de l'Aiguillon : la slikke et le schorre.

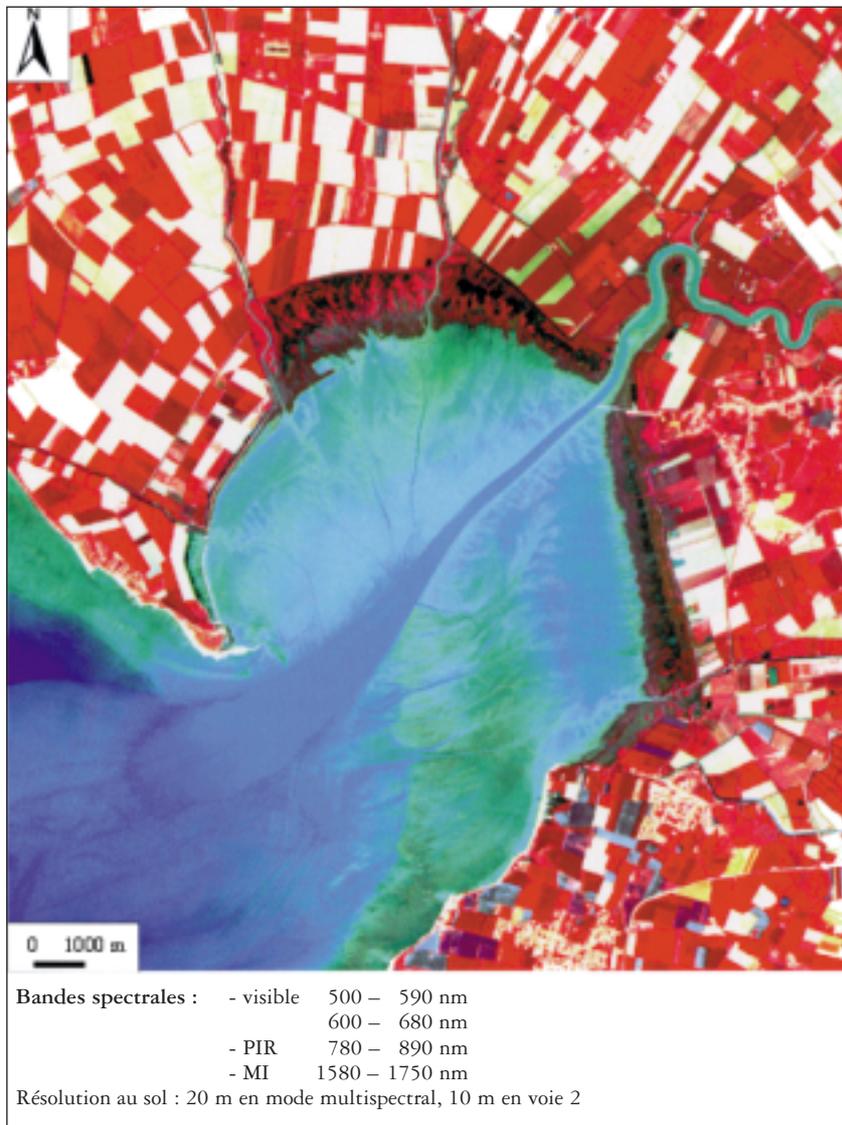


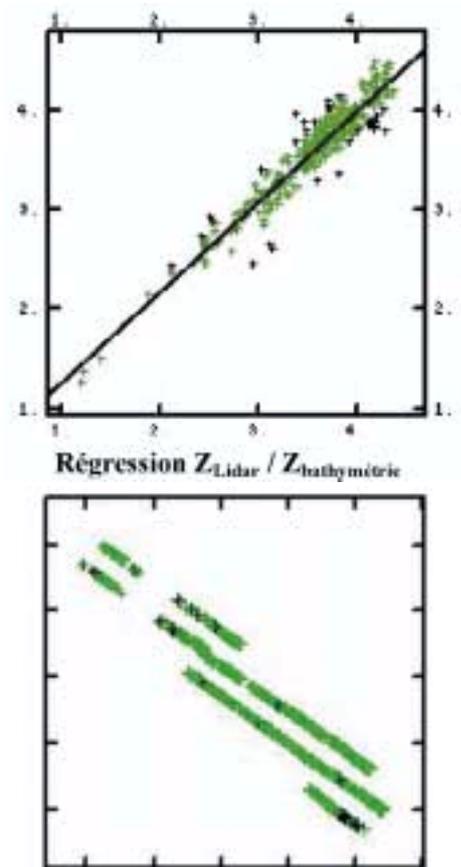
Figure 5 : Scène Spot4 du 5 mai 2000, 10b50 TU, composition colorée des canaux 1, 2, 3

contrôles interne et externe, filtrage) pour finalement fournir à l'Ifremer un fichier numérique de plus de 10^7 points d'élévation géoréférencés. Les élévations sont des hauteurs ellipsoïdales exprimées dans le système UTM (WGS 84). Les précisions annoncées sont de 15 cm sur les 3 axes. Excepté sur les dépressions humides encore inondées, pour lesquelles la réflexion laser est plus faible, la densité moyenne est d'un point pour 9 m^2 . Elle est plus forte au niveau du recouvrement des bandes (meilleure qu'un point pour 3 m^2).

L'analyse critique des données laser

La confrontation avec la bathymétrie

La qualité des mesures laser a été appréciée en zone unie et dépourvue de végétation grâce aux sondes bathymétriques disponibles sur la partie basse de l'estran. Les deux techniques, altimétrie par laser aéroporté et bathymétrie, ont été confrontées sur une partie de la vasière présentant la dynamique la plus forte, à savoir dans la direction de plus gran-



Figures 6 : diagramme de corrélation entre Lidar et bathymétrie (coefficient 0.954) et localisation des points de plus fort désaccord.

de pente. Les points couvrant des zones inondées lors de l'expérimentation, notamment au niveau du chenal principal, ont été exclus car la technique aéroportée y mesure au mieux la surface de l'eau, la lumière infra-rouge n'y pénétrant pas.

Par la suite, une analyse de voisinage entre les deux jeux de données a permis de constituer près de 340 couples de mesures, l'une laser, l'autre bathymétrique, éloignées de moins d'un mètre. Afin de pouvoir être comparées, les mesures de hauteur ont alors été exprimées par rapport à la même référence altimétrique, en estimant localement, au niveau de la Pointe Saint-Clément, l'écart entre l'ellipsoïde WGS 84 et le zéro hydrographique. Il est ainsi apparu qu'en moyenne, les estimations de hauteur ne diffèrent que de 2 cm, avec un écart-type de 16 cm. La figure 6 met en évidence la

Une équipe de l'Ifremer s'est chargée d'installer sur le promontoire de la pointe Saint-Clément, une station GPS permettant de travailler en mode différentiel avec le récepteur GPS embarqué.

forte corrélation existant entre les deux jeux de données. On observe toutefois quelques points pour lesquels le désaccord entre altimétrie laser et bathymétrie est plus important, de l'ordre de 50 cm. Ces points (en noir sur les figures 6) se répartissent spatialement de manière aléatoire : ils semblent par conséquent ne résulter que des erreurs de mesure.

La forte concordance observée entre les deux techniques atteste de la qualité des estimations d'altitude obtenues par laser sur la partie basse de l'estran. Seules les dépressions humides font exception et sont l'objet d'une surestimation des hauteurs par le laser.

L'influence de la végétation

Il s'est révélé plus difficile d'estimer la qualité des données laser sur la partie herbue de l'estran. En effet, le problème qui se pose est de savoir si, en moyenne, le signal reflète l'altitude du sol, du sommet de la végétation ou d'un niveau intermédiaire. L'image Spot4 a permis en cela de déterminer si le type de végétation, dense ou épars, rase ou élevée a des répercussions quantifiables sur les mesures d'altitude.

La scène couvrant le schorre a fait l'objet d'une classification supervisée dans les 4 canaux spectraux (figure 7). Les 6 classes représentées ont été définies en s'aidant des observations faites sur le terrain. Chaque classe est associée à un type de végétation spécifique en densité et en hauteur. La classe vase sert de référence et permet de qualifier les mesures en zone nue.

Dans un deuxième temps, les données laser ont été échantillonnées sur une grille à maille régulière de 10 mètres de côté. Sur chaque cellule on a calculé l'écart-type moyen de l'élévation en supposant la topographie plane à cette échelle (vrai à 0,5% près). Bien que calculé sur seulement 23 échantillons d'altitude en moyenne, ce paramètre nous est apparu comme le plus à même de révéler l'influence de la végétation sur le signal. En effet, l'observation d'un fort écart-type dans le cas présent peut a priori avoir deux origines : ou bien il s'agit d'un effet de la topographie, ou bien les altitudes mesurées reflètent tantôt le niveau du sol tantôt celui du sommet de la végétation. Le voisinage de 10 mètres a été

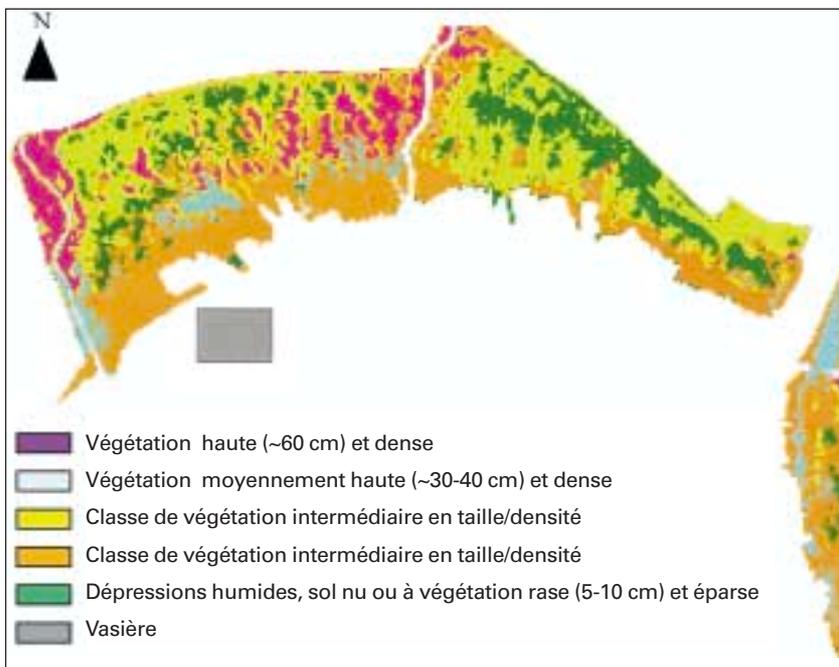


Figure 7 : Classification supervisée de l'image Spot4, partie nord du schorre.

Table 1 : écart-type du signal Lidar en fonction de la classe de végétation

Classe	Ecart type moyen sur Z (cm)
Végétation haute (60 cm) et dense	0.21
Végétation moyennement haute (30-40 cm) et dense	0.15
Classe de végétation intermédiaire en taille/densité	0.12
Classe de végétation intermédiaire en taille/densité	0.13
Dépressions humides, sol nu ou à végétation rase (5-10 cm) et épars	0.09
Vasière	0.09

choisi de manière à s'affranchir au mieux du relief (5 cm de bruit au maximum). La grille d'écart type obtenue a été par la suite confrontée à la scène classifiée, en associant à chacune des 6 classes un écart-type moyen de l'élévation. Le tableau ci-dessus présente les résultats.

On observe sans surprise que plus la végétation est haute et dense, plus l'écart type est élevé. Il s'échelonne entre 7 cm en zone de vasière et près de 15 cm en zone herbue. Ce résultat confirme bien qu'au niveau du schorre, le signal est souvent réfléchi avant d'avoir atteint le sol. La qualité des estimations d'altitude y est donc moindre : en plus de l'imprécision intrinsèque aux données, il convient d'y ajouter celle engendrée par la présence de la végétation. Les écarts-types observés expriment toutefois un éloignement par rapport à une élé-

vation moyenne dont on ne sait pas réellement si elle reflète plutôt le niveau du sol ou celui du sommet de la végétation. Mais compte tenu de nos observations sur le terrain, on peut estimer en première approximation qu'en moyenne, une mesure se situe à mi-hauteur, ce qui nous amène à penser que l'erreur d'estimation d'altitude est augmentée au plus de 30 cm sur les zones à végétation la plus haute. Notons que dans tous les cas, cette végétation haute ne couvre que 15% environ de la zone.

Exploitation des données altimétriques : conception d'un MNT

Pour illustrer les potentialités de l'altimétrie par laser aéroporté en termes de caractérisation des

estran, un MNT de l'anse de l'Aiguillon a été conçu avec une taille de pixel de 5 mètres. Les données laser ont préalablement été filtrées pour ne garder qu'un point de mesure tous les 2 mètres, soit au total environ 3.5 millions de points. Une analyse géostatistique, notamment l'étude du comportement variographique à grande et petite échelle, a permis par la suite de mettre en lumière les propriétés structurales des données pour les reproduire au moyen d'un modèle variographique. Une fois le modèle testé et validé, l'interpolation par krigeage a été réalisée sur une grille à maille régulière de 5 mètres. L'opération a abouti à un MNT affichant une précision d'environ 15 cm sur la partie vaseuse, 30 cm sur la partie herbue de l'estran (figure 8).

Conclusion et perspectives

Cette première mise en œuvre de la technique d'altimétrie par laser aéroporté en zone littorale est plutôt concluante. Elle confirme son utilisation

Les mesures dépassent nettement en densité ce que l'on peut obtenir par les moyens classiques et même si la précision reste affectée par la végétation de schorre, elle est toutefois susceptible d'être améliorée par une meilleure connaissance de l'interaction fine du signal avec la surface.

pour une meilleure caractérisation biophysique des estrans. Les mesures dépassent nettement en densité ce que l'on peut obtenir par les moyens classiques et même si la précision reste affectée par la végétation de schorre, elle est toutefois susceptible d'être améliorée par une meilleure connaissance de l'interaction fine du signal avec la surface. D'autres comparaisons à des mesures de terrain permettront d'affiner encore ces résultats. Ces données autorisent d'ores et déjà un grand pas en avant pour l'amélioration des modèles à maille fine de la zone très côtière, ou encore par exemple pour la détermination des zones submer-

sibles en cas de surcote de marée. ●

Remerciements

Nos remerciements vont au programme ISIS du CNES qui nous a permis d'acquérir l'image SPOT à tarif préférentiel.

Pour toute correspondance

Jacques Populus, IFREMER
jpopulus@ifremer.fr

Références

[AXE99] Axelsson P., 1999 Laser scanning : une nouvelle technique innovante vers de nouvelles possibilités d'applications dans l'espace, INIST CNRS, *Revue XYZ*, N° 78.

[BOT98] Bottu, E., 1998. Laser scanning applied to vegetation height and roughness length determination. Mémoire de fin d'études, ESGT, Le Mans.

[HUI97] Huising E. J., 1997. Evaluating laser scanning and other techniques to obtain elevation data on the coastal zone. Proceedings of the 4th International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, Orlando, Florida. *ERIM*.

[HUI98] Huising E. J., 1998. Laser Scanning for Topographic Applications: from Fiction to Reality. in Operational Remote Sensing for Sustainable Development, Vaughan and Molenaar (eds), *Balkema*, Rotterdam.

[LEM97] Lemmens J. P., 1997. Accurate height information from airborne laser altimetry, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, p 222-234.

[KRA99] 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.

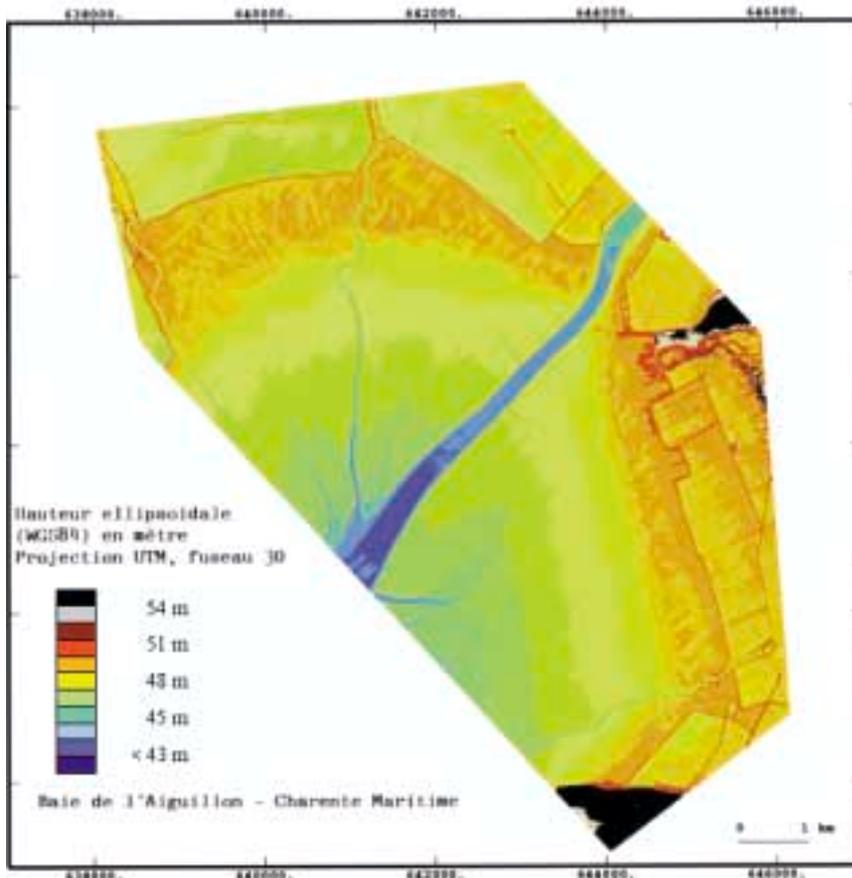


Figure 8 : Modèle numérique de terrain à maille de 5 mètres