

Nouveaux outils au service du littoral : la topographie par télémétrie laser aéroportée

Jacques Populus*, Vincent Deshoux**

* Ifremer, DEL/AO, Centre de Brest

** Loire Estuaire, Cellule de Mesures et de Bilans

Résumé

Lever la topographie de la zone côtière à l'aide de la technique du télémètre laser (Lidar) aéroporté présente de multiples avantages par rapport aux méthodes classiques : la mesure est rapide, dense et précise, autorisant la cartographie du relief de zones d'estran difficilement accessibles aux moyens classiques. L'Ifremer et la Cellule de Mesures et de Bilans ont organisé en 2002 la couverture de plusieurs sites du littoral ouest de la France. La mise en oeuvre des levés et la validation des données sont rapidement exposés, ainsi que la précision que l'on peut en attendre, sur sol nu et végétation basse.

Au plan des applications, la cartographie des habitats, objet du réseau "Réseau benthique" (Rebent, aujourd'hui opérationnel en Bretagne), utilise conjointement le relief et l'information délivrée par les orthophotos ou les images satellitales. En outre, la fusion de l'intensité du signal laser avec l'orthophoto littorale a permis la confection d'une composition IRC (Infrarouge couleur), qui augmente le potentiel discriminatoire sur les faciès végétaux.

En zone littorale, la modélisation hydrodynamique et hydro-sédimentaire exige une connaissance précise de la bathymétrie, y compris celles des estrans. Des modèles bathymétriques globaux, à maille de plus en plus fine, obtenus par concaténation de divers fichiers, sont utilisés en entrée des codes de calcul.

Dans l'estuaire de la Loire, un MNTU (Modèle Numérique de Terrain Unifié) a été confectionné par agrégation de données topographiques de résolutions planimétrique et altimétrique différentes : MNT laser, MNT bathymétrique, MNT photogrammétrique et BD Alti. Les premières exploitations ont permis de cartographier précisément les surfaces marnantes, et de calculer les volumes d'eau en transit dans l'estuaire à la faveur des marées.

En perspective, une discussion est amorcée sur la comparaison entre la technique Lidar et la restitution photogrammétrique, et sur une stratégie possible en vue d'une large couverture du littoral français par la recherche d'une méthode simple, facilement reproductible et peu onéreuse.

Mots-clés

Altimétrie, bathymétrie, Lidar, photogrammétrique, littoral, zone côtière, marée, modélisation hydrodynamique, MNT.

Introduction

La connaissance fine des zones côtières, au plan écologique comme à celui des activités économiques, est essentielle. Une topographie précise permet de pallier le manque de données sur :

- la dynamique sédimentaire,

- la cartographie des habitats benthiques (<http://www.ifremer.fr/rebent/>) et la topographie fine des zones de marais maritime,
- le trait de côte, à des fins d'aménagement ou réglementaires, comme la limite du domaine public maritime,
- la topographie de détail nécessaire aux modèles hydrodynamiques à maille fine appliqués à des problématiques très locales (rejets et dilution, transport sédimentaire, submersion, capacité trophique, etc...),
- l'emprise spatiale de certains aménagements sur l'estran (en particulier tables ostréicoles et bouchots), utile à une meilleure gestion des activités.

En zone d'estran, généralement d'accès difficile aux moyens nautiques comme d'arpentage, les techniques conventionnelles sont peu opérationnelles. La restitution du relief par photogrammétrie classique montre rapidement ses limites en termes de précision (au mieux 0.40 m sur zone très "texturée" avec les clichés au 1/25 000). Si l'on veut atteindre une meilleure précision, le Lidar n'apparaît-il pas comme la solution d'avenir ?

La technique Lidar et ses particularités en milieu littoral

Rappels techniques sur le Lidar

Le télémètre laser émet un rayonnement à haute fréquence d'impulsions (jusqu'à 80 000 Hz), dans l'infrarouge proche (typiquement 1 064 μm) en topographie, dans le visible (secteur vert 532 μm) en bathymétrie. Il est accompagné sur la plate-forme (avion ou hélicoptère) d'un système de positionnement GPS qui détermine très précisément la position de l'avion et par conséquent celle de l'altimètre laser au cours de la télémétrie, ainsi que d'une centrale de navigation interne INS (Inertial Navigation System), utilisée pour déterminer translations et changements d'attitude du capteur occasionnés par les mouvements de l'avion (roulis, lacet, tangage). L'écart en temps entre l'instant d'émission et l'instant de réception du signal est proportionnel à la distance parcourue par ce dernier. On interprète au retour une onde lumineuse qui a été rétrodiffusée par les obstacles qu'elle a rencontrés. Dans le cas d'arbres par exemple, plusieurs retours sont possibles, sur le sommet de la canopée ainsi que sur le sol. On parlera de "first" et "last pulse". Sur l'estran, on obtient pour l'essentiel des points du sol, excepté pour quelques aménagements aquacoles (par exemple les bouchots).

La contrainte météorologique principale est de voler sous les nuages. L'éclairage solaire n'intervient pas, puisque le système est « actif » : les vols de nuit sont donc possibles (voire préférable).

Contraintes en milieu littoral

La marée contraint fortement les levés sur les estrans. Pour lever au maximum le bas-estran sur des sites à configuration physique complexe, on ne peut utiliser qu'une fenêtre de 60 minutes répartie avant et après la basse mer. On ne trouve **en moyenne** par an que 20 jours de coefficient de marée supérieur à 100. Dans tous les cas, les axes de vol doivent être assez longs pour réduire l'incidence des demi-tours.

Les deux plans de vol illustrés ci-dessous (figure 1) sont radicalement différents. Sur la baie du Mont Saint-Michel, aux formes régulières, le vol démarre un peu après mi-marée descendante (axe 1) de manière à descendre avec la marée. Dans ce cas particulier d'axes longs, on a pu couvrir les 300 km² de la baie en 4 heures environ (2 vols). Plus généralement, à l'image du golfe du Morbihan, le taux de couverture est de l'ordre de 50 km² par heure. Ici, le retard de marée de 2 heures entre l'entrée et le fond du golfe entraîne le plan de vol

suivant : les zones A et D sont couvertes successivement lors de la même basse-mer, puis B et E, puis C et F. A noter que sur ces deux chantiers, on visait une densité de l'ordre d'un point pour 3 m², obtenue avec une attitude de vol de 1 000 mètres (fauchée de 0,7 fois l'altitude) et une vitesse d'environ 150 noeuds. La tache d'insolation a alors un diamètre de 0.25 m.

Outre ces contraintes d'acquisition soumises à l'heure locale de basse mer, les plans de vol de l'estuaire de la Loire ont également pris en compte la propagation de la marée dans l'estuaire et le décalage de l'heure de marée basse d'environ 2 heures 30 entre l'aval (Saint-Nazaire) et l'amont (Nantes). Les acquisitions se sont déroulées les 13 et 14 août 2002 (coefficient de 90) réparties selon 3 vols dont 2 de nuit. Au final, 6 000 hectares sont couverts avec une restitution de 1 point/m² et 6 000 hectares à 1 point/4m².

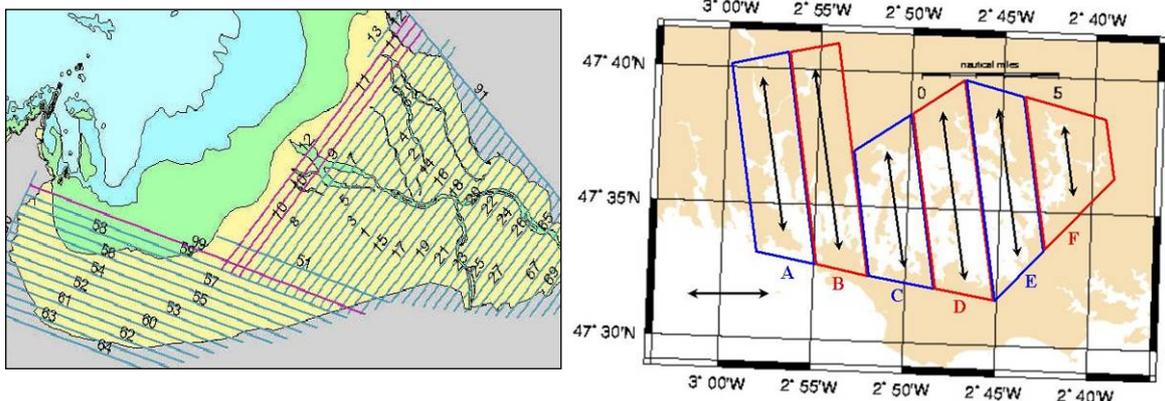


Figure 1 : Deux exemples de plan de vol Lidar, à gauche la baie du mont Saint-Michel, à droite le golfe du Morbihan.

Rattachement des niveaux altimétriques

La mesure altimétrique repose entièrement sur la maîtrise de la géodésie (figure 2). Basé sur le GPS, le Lidar mesure des hauteurs sur l'ellipsoïde IAG-GRS80 propre au système géodésique WGS84, positionnée en coordonnées sphériques. Ces dernières doivent ensuite être rapportées au système de coordonnées planes en vigueur, en France le Lambert 93, qui utilise la référence d'altitude par rapport au géoïde, appelée IGN 69.

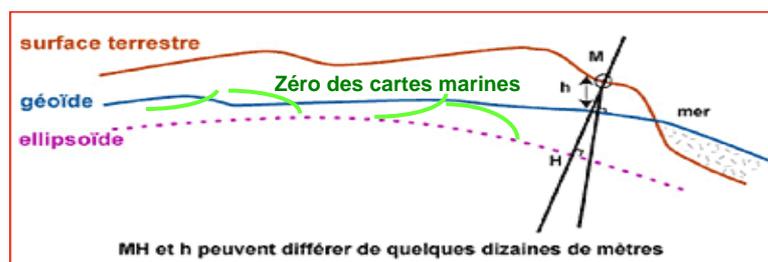


Figure 2 : références altimétriques

Le rattachement entre ces deux altitudes se fait par utilisation de la grille RAF 98 qui en donne les écarts tous les 2.5 km. Les levés Lidar étant utilisés entre autres pour la prédiction des déplacements de masses d'eau, un rattachement doit ensuite être fait avec le zéro hydrographique (plus basse mer théorique du lieu). Son écart au repère IGN69 n'est donné aujourd'hui qu'en 120 ports de marégraphie précise, les progrès de la modélisation hydrodynamique devant fournir bientôt une grille le donnant en tout point.

Traitements et produits

La procédure de post-traitements permettant de fournir in fine les fichiers de restitution microtopographique demande plusieurs mois de travail.

Suite à l'acquisition, le prestataire procède aux calculs des trajectoires et altitude de l'avion par traitement des signaux dGPS/INS (système inertiel), à l'ajustement des bandes de vols entre elles, puis au géoréférencement, à l'élimination des artéfacts et au lissage des lignes de rupture artificielles, avant la production finale des modèle numériques de surface (MNS). Il effectue aussi les filtrages des données pour l'identification de la végétation et du bâti, nécessaire pour l'élaboration du modèle numérique de terrain (MNT) correspondant au sol réel.

Au préalable, il convient de traiter les lacunes d'acquisition, généralement les petites pièces d'eau, en affectant à ces secteurs la plus basse valeur observée sur leur pourtour. Ensuite, le filtrage est établi selon un masque "sol/hors-sol" par détection des ruptures de pente. Les points "sol" servent alors à la constitution d'un nouveau MNT confronté avec les photographies aériennes prises à la même date. Le prestataire livre ensuite au maître d'ouvrage l'ensemble des fichiers du MNT et du MNS, les fichiers "vecteur" des filtrages étant également proposés par le prestataire (en général végétation et bâti).

Dans l'estuaire de la Loire, en présence de végétation haute et très dense, comme les roselières (figure 3), plusieurs échos sont enregistrés, sur le sommet de la végétation et sur le sol. Avec l'association "firt pulse - last pulse" et l'utilisation du filtre "végétation", une véritable photographie des roselières est exploitable et intégrable comme couche d'information dans un SIG.

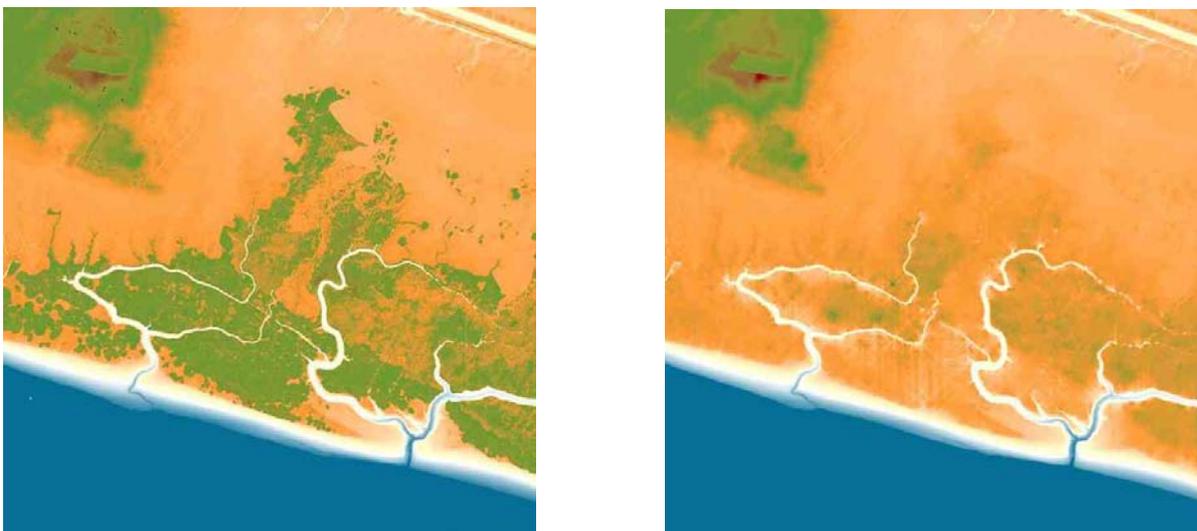


Figure 3 : à gauche, le Modèle Numérique de Surface avec la roselière, à droite le Modèle Numérique de Terrain filtré de la couverture végétale (rive nord de l'estuaire de la Loire entre Donges et Cordemais)

Enfin, plusieurs types de produits sont livrés, depuis le semis de points, la représentation classique du relief en courbe de niveaux, jusqu'au MNT en mode maillé, représentation surfacique de la topographie.

Optimisation des levés en fonction des objectifs

Bien en amont de l'organisation d'une mission Lidar, une réflexion quand à l'optimisation de la technique est primordiale. En effet, un certain nombre de contraintes et de pré-requis conditionnent le choix de cette technologie :

- les zones d'acquisition doivent être assez étendues pour que le coût global soit valorisé (mobilisations du matériel et de l'aéronef) avec des bandes de fauchée relativement longues pour diminuer le nombre des demi-tours et accroître la proportion de vols utiles.
- une réflexion sur l'intégration des données au sein des SIG est primordiale, puisque le lidar permet l'obtention de données topographiques de très haute résolution, mais difficilement manipulables. En outre, les formats de fichier, tant ascii (jusqu'à 100 Mo pour un pavé de 2 km x 2 km avec une résolution de 1m²), que raster (importation non systématique vers l'ensemble des SIG du marché) demandent parfois des adaptations logicielles.
- la résolution planimétrique maximale de 1 point/m² s'avère idéale pour des utilisations à très grande échelle (de quelques hectares à quelques kilomètres carrés). Par contre, il est souvent nécessaire de dégrader l'information et de réfléchir à la mise en place de produits sous-échantillonnés avec des pixels de 4, 10 voire 100 m² pour des études à petite échelle (quelques dizaines de kilomètres carrés). Et pour la valorisation des données, ce choix d'une acquisition à 1 m² n'engendre pas les mêmes effets, en termes de rapidité et de possibilités de traitement qu'une acquisition à 4 m².

Photogrammétrie et Lidar : avantages et contraintes

Précision des données Lidar

La précision du Lidar, pour une altitude de survol de 1000 mètres et sur sols nus et peu déclinés est réputée atteindre entre 0.10 et 0.15 m. Elle se dégrade avec la pente ainsi qu'en présence de végétation basse telle que celle des marais maritimes. Lors des missions de 2000 et 2002, des comparaisons ont été effectuées sur des zones de contrôle levées au dGPS cinématique. Les données du tableau 1 concernent des levés Lidar de 2000 et 2002, et des levés de terrain issus de plusieurs intervenants sur divers sites (Populus, 2003). De légers biais affectent les écarts moyens, tandis que les écarts-types restent inférieurs à 0.15 m, ce qui confirme les valeurs de la littérature (Huisling, 1998; Joinville, 2002).

Zone de Contrôle	Distance entre points	Nombre de couples	Moyenne des écarts (m)	Ecart type des écarts
Le Croisic, terrain de foot (Ifremer, dGPS 09/02)	1 m	665	0.04	0.10
Le Croisic, plage (Ifremer, dGPS 09/02)	1 m	774	-0.02	0.13
Baie de l'Aiguillon 2000 (DDE, dGPS 09/00)	0.5 m	283	-0.01	0.11
Plage de la Gouvelle (Univ. Nantes, dGPS 09/02)	0.4 m	64	Ecart < 0.1m (64%)	
Trégor (Ceva, dGPS, automne 02)	NA	40	0.09	0.08
Mt Saint-Michel (Ifremer, sondes, 03/02)	5 m	1161	0.07	0.27
Baie de l'Aiguillon 2000 (DDE, sondes, 1999)	1 m	341	0.02	0.16

Tableau 1 : Moyenne des écarts $Z_{Lidar} - Z_{terrain}$ entre couples co-localisés Lidar/dGPS

Sur végétation basse typique de marais maritimes il devient difficile de dire où la rétrodiffusion de la lumière s'effectue dans une tache d'insolation de diamètre 0.25 m. Sur le sommet d'une végétation très couvrante de type Obione, la précision reste 0.15 m, peu

différente de celle sur sol nu. On sait alors inférer la position du sol. Sur une graminée plus dressée et moins dense, la rétrodiffusion est générée à un niveau quelconque entre sol et sommet : la précision de détection du sol devient alors inférieure à 0.20 m, comme le montre la classification d'une image Spot du schorre nord de l'anse de l'Aiguillon (Populus et al., 2001).

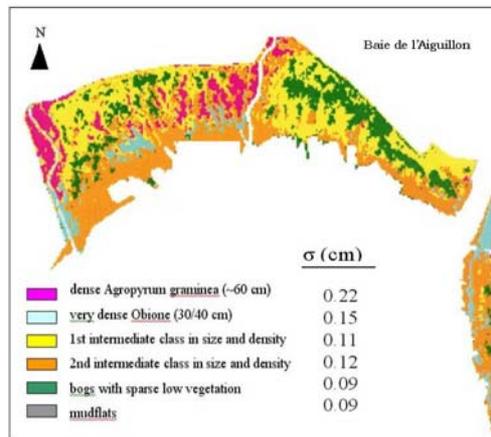


Figure 4: Image Spot 4 de l'anse de l'Aiguillon (5 mai 2000) classée en 5 types de végétation de schorre.

Précision des données de photogrammétrie

La précision des restitutions photogrammétriques est étroitement dépendante, d'une part de l'échelle de prise de vue, d'autre part de la texture du sol. Une première approche comparative a été effectuée par l'Ifremer sur le site du Croisic (Laurentin, 2002). Des restitutions stéréoscopiques ont été effectuées sur des couples de clichés au 1/25 000 (scannés à la résolution de 0.50 m) de la mission "ortholittorale" acquis en août 2000. Une comparaison sur 500 points d'estran (roches et grève sableuse) levés au dGPS cinématique a fourni un écart moyen quadratique (emq) de 0.50 cm ce qui correspond exactement à la valeur théorique (CNIG 1993). D'autres comparaisons de résultats de photogrammétrie par rapport au Lidar sur vasières très homogènes en baie de l'Aiguillon ont donné sur 160 000 points un emq de 1.22 m, montrant la dégradation critique de la restitution stéréoscopique sur cibles sans texture.

Une seconde étude comparative a été menée par la Cellule de Mesures et de Bilans. Sur l'estuaire de la Loire, une mission photogrammétrique a été calée sur la mission Lidar. Le vol a eu lieu dans l'après-midi du 13 août 2002 avec des prises de vues selon 2 échelles : 1 / 15 000 en couleur (pour la production d'orthophotographies) et 1 / 7 500 en panchromatique pour le MNT.

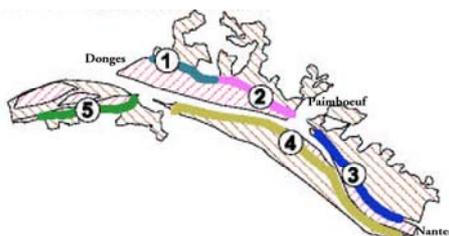


Figure 5 : les 5 zones de recouvrement LIDAR - photogrammétrie

Zone	Moyenne des écarts (m)	Ecart-type (m)
1	-0.01	0.24
2	-0.25	0.22
3	-0.22	0.39
4	-0.25	0.38
5	-0.11	0.34

Tableau 2 : différences d'altitudes couples co-localisés Lidar/photogrammétrie distants de moins d'1 mètre

Le MNT au pas de 1 point/100 m² est obtenu par auto corrélation de couples photo et visualisation en stéréoscopie à l'écran du restituteur numérique. Chaque point du MNT constitue une moyenne pondérée en surface d'un groupement de 16 points d'où un gain en précision, et l'élimination des pics, par exemple causés par des mesures prises au sommet d'arbres isolés (Aerovista, 2002).

La comparaison statistique des données altimétriques obtenues par les deux types de modèles dans les zones de recouvrement est possible en utilisant une bande d'environ 50 m de large (figure 5). Les différences supérieures à 1 m, soit 2.5 % des points n'ont pas été prises en compte. Les statistiques sont établies pour les 5 fichiers du MNT photogrammétrique (tableau 2).

Cette analyse met en évidence un écart-type médian d'environ 30 cm, les différences étant plus importantes pour les zones mixtes de couvert végétal dense et haut, types roselières (zones 3 et 4) et de prairies humides (5), que sur des zones de végétations homogènes et basses (zones 1 et 2). La précision du MNT photogrammétrique dépend certes étroitement du type de relief et de texture du sol rencontré, mais également de la résolution finale du MNT. Dans ce cas, elle n'est que de 1 point / 100m² alors qu'avec des clichés au 1/7 500, il est possible d'obtenir des MNT beaucoup plus précis et plus proche en résolution altimétrique des résultats obtenus par Lidar.

Eléments de coûts et avantages : stratégie de couverture

Sur les zones sédimentaires de nature homogène, seul le Lidar est adapté, du fait de la perte de précision de la photogrammétrie, même sur clichés à grande échelle. Sur les autres faciès, présentant une dominante rocheuse, la méthode photogrammétrique peut être envisagée. Toutefois, il conviendrait, pour répondre aux attentes d'un réseau tel Rebut, d'acquérir des clichés à une échelle largement supérieure au 1/25 000. Sur les zones présentant à la fois roches et sables, la précision du MNT sera diminuée dans les parties sédimentaires. Ceci ne constitue pas un problème majeur, les documents planimétriques donnant un bon rendu des aspects morphologiques. Il paraîtrait inadapté de panacher les deux techniques sur des zones de surface réduite. La méthode photogrammétrique elle-même ne peut être envisagée que sur une large superficie : elle est pertinente dans la mesure où elle est utilisée pour un bloc de clichés. En effet, sur des zones isolées ne comportant que quelques clichés, le coût de la stéréopréparation serait dissuasif.

Les estimations de coût sont les suivantes : au km², le Lidar (traitements d'interpolation inclus) revient à environ 400 euros pour une densité de 1 point pour 4 m².

Les estimations faites en photogrammétrie sont à moduler. Si l'on utilise les clichés quasi-gratuits de l'ortholittorale, le coût de restitution sur une maille de 5 mètres s'établit à 60 euros au km². Cette valeur doit être revue à la hausse si l'on vise une maille de 2 mètres.

Si l'on doit restituer avec une précision s'approchant, sur sols texturés, de celle du Lidar, il convient d'utiliser des clichés au 1/6 000, dont l'écart-type sur restitution altimétrique est de 0.13 m (CNIG, 1993). Le coût de levé de tels clichés et leur restitution photogrammétrique, toutes sujétions comprises, est estimé à environ 300 euros par km². Il convient de signaler en outre que le levé photographique de l'estran à basse mer à une telle échelle est presque une gageure et que même à cette échelle, la précision sur de grandes étendues sédimentaires resterait en-deça de la précision nominale.

Applications

La cartographie des habitats du réseau Rebut

La répartition des espèces intertidales et de leurs habitats résulte de la combinaison de facteurs physiques et biologiques. Les premiers incluent la profondeur, le type de fond, mais aussi l'exposition, la turbulence, la clarté de l'eau, le contenu en nutriments etc... En zone intertidale sédimentaire, la dynamique des masses d'eau façonne la géomorphologie. Si les formes du terrain apparaissent souvent clairement sur les documents planimétriques (photographies, images) et laissent deviner le relief, il est vrai que la connaissance précise du relief renforce considérablement le pouvoir discriminant de l'interprète. Quant aux faciès rocheux, la couverture d'algues y gomme souvent le relief, le paysage semblant alors assez homogène sur les clichés. Les documents planimétriques ne suffisant pas à séparer les ceintures (texture très semblables entre les groupe d'algues brunes), le relief permet alors le levé de doute. On montre ainsi sur des zones battues des Côtes d'Armor que la limite inférieure des fucales ne s'écarte guère d'une position moyenne plus ou moins 15 cm. Enfin, dans les marais maritimes, la micro-topographie d'ordre décimétrique régit la répartition de la végétation haline, fonction à la fois de l'altitude et de la pente. On illustre sur la figure 6 les travaux faits sur le secteur Rebent "Trégor" par une vue Lidar globale de la zone, avec espacement des couleurs de 0,25 m.

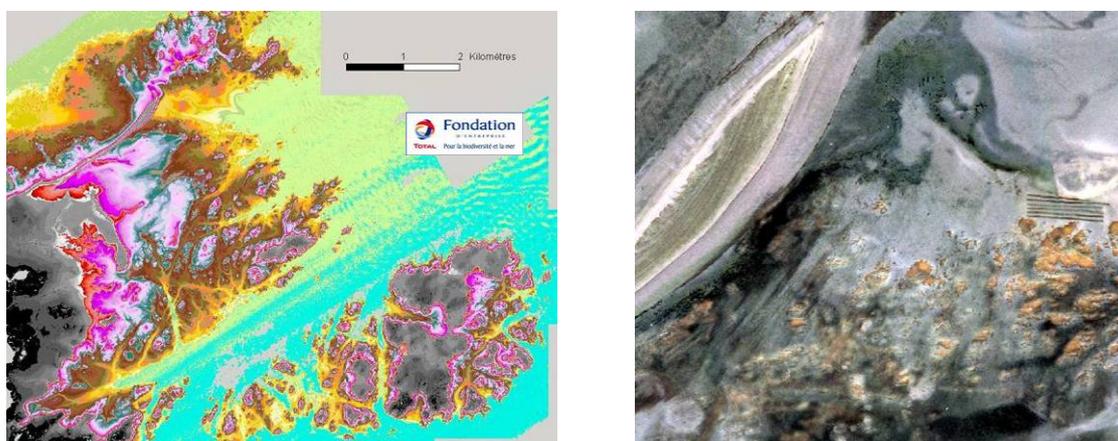


Figure 6 : à gauche, vue globale du chantier Lidar sur le Trégor (Bréhat et presqu'île de Pleubian), à droite fusion de l'intensité du Lidar avec une photographie aérienne (sillon du Talbert)

Par ailleurs, l'intensité du signal Lidar, bien que grandeur non calibrée, a été utilisée par fusion avec l'ortholittorale pour tenter de générer une composition IRC (infrarouge couleur). La méthode employée conserve les «canaux» vert et rouge de la photographie et leur adjoint l'image d'intensité Lidar en niveaux de gris. La figure 6 montre un extrait sur les taches de fucales à l'est du Sillon du Talbert. Outre l'apport à la photo-interprétation, il reste à tester les possibilités de classification automatique des images numériques ainsi élaborées.

La modélisation hydrodynamique (Traict du Croisic)

Les traicts du Croisic et de Pen-Bé et leurs bassins versants concentrent, sur des surfaces restreintes, des activités économiques très importantes et étroitement liées à la qualité de l'eau (conchyliculture, saliculture, tourisme). Une étude est en cours pour mieux comprendre le fonctionnement des secteurs conchylicoles du Croisic et de Pen-Bé et tenter d'expliquer les problèmes qui y ont été identifiés (mortalité, pathologie des coquillages, envasement, qualité des eaux et des sédiments,...). Ceci nécessite l'évaluation des apports par les bassins versants, tant physico-chimiques (nitrates, nitrites, phosphates, matières en suspension,...) que bactériologiques (*Escherichia coli*). Les flux ainsi évalués viennent alimenter un modèle hydrodynamique qui permet de comprendre le mouvement des masses d'eau dans les traicts et

de suivre le devenir des polluants en fonction de différentes conditions météorologiques, ainsi que de simuler l'impact de leur réduction ou de leur augmentation.

Les codes de modélisation hydrodynamique achoppent sur la connaissance précise de la bathymétrie. Dans une zone telle que le traict du Croisic, le modèle fin MARS à maille de 30 mètres utilise un MNT global provenant de trois sources, SHOM, DDE et Lidar. Ces données sont examinées sur leur zone de recouvrement. Après examen critique des écarts, on tend à conserver la donnée la plus récente/fiable. Enfin, une interpolation par krigeage sur la maille finale est effectuée.

Une réflexion est en cours pour tenter d'évaluer, à partir des données existantes et d'un modèle hydrodynamique de plus grande emprise, l'impact des apports de la Loire et de la Vilaine sur les traicts. A noter que ce dernier modèle utilise les sondes SHOM classiques de densité faible.

La figure 7 est une sortie du modèle MARS à maille de 30 mètres illustrant la divergence de panaches de dilution, issus de sources très proches au port du Croisic, de 3 injections d'un constituant chimique lors d'une pleine mer de vive eau (coefficient 110), après 10 jours de simulation.

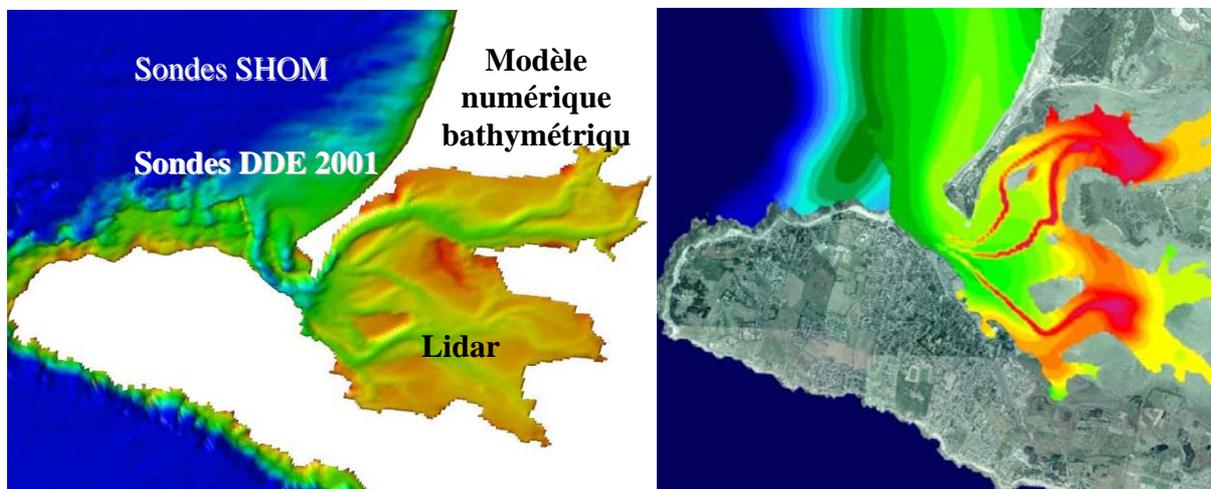


Figure 7 : à gauche, modèle numérique bathymétrique obtenu par synthèse de 3 types de données sur maille de 30 mètres, à droite simulation de dispersion d'un polluant dans le Traict du Croisic (courtoisie société Seamer)

Les surfaces marnantes de l'estuaire de la Loire

Il s'agit de rendre compte d'une des caractéristiques de la géométrie de l'estuaire de la Loire et de son type de fonctionnement, tant hydraulique (frottement), sédimentaire (dépôt et remise en suspension de matériaux fins suivant la vitesse des courants) et géochimique (accumulation et dispersion de micropolluants), que biologique et écologique (peuplements benthiques essentiels aux chaînes alimentaires des poissons et des oiseaux).

Les limites des surfaces marnantes correspondent aux marnages extrêmes. Pour cette étude, dans le lit vif de la Loire, la courbe de niveau 0m Cotes marines ou -3,16 m IGN69 en est la limite inférieure (plus grande marée théorique) tandis que la courbe de niveau +5,86 m CM ou +2,70 m IGN69 en est la limite supérieure, au-delà de laquelle les eaux sont considérées comme débordantes sur le domaine terrestre.

Entre ces deux limites, on détermine à partir de l'extraction du MNT un ensemble de classes de hauteurs. L'équidistance 1 m est suffisante pour la détermination des contours et le calcul des surfaces, une extraction des isolignes intermédiaires pouvant être réalisée à tout moment.

Ensuite, il est possible de calculer la fréquence de recouvrement des surfaces marnantes, qui dépend de l'occurrence des différents types de marée. Ainsi, pour le bief le plus aval, entre

Saint-Nazaire et Paimboeuf, 47% de la zone sont toujours en eau et 53% sont soumis au marnage. Et les marées extrêmes de l'année 2002 (coefficients 30 le 1er octobre et 118 le 30 mars) occupent respectivement 340 ha et 1232 ha de surfaces marnantes. Il est également possible de classer les valeurs des pentes en tout point du MNT (figure 8).

Au final, une cartographie exhaustive et précise des surfaces marnantes est établie dans l'estuaire interne de la Loire, et le calcul des superficies est actualisé.

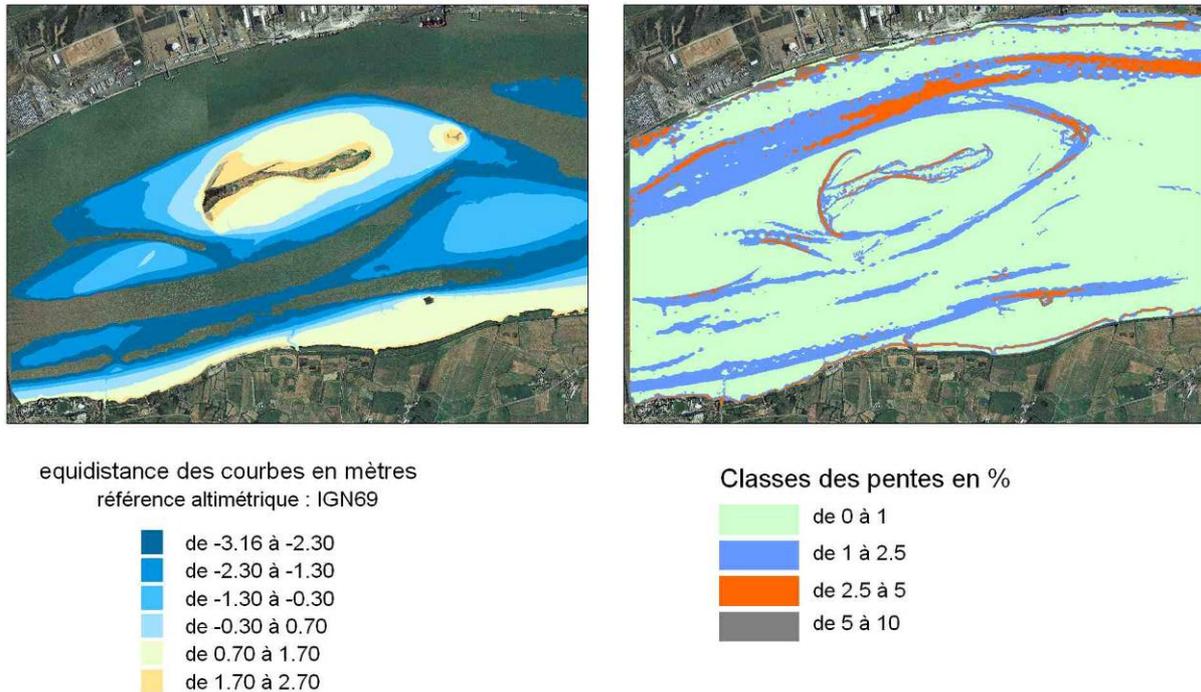


Figure 8 : à gauche, les surfaces marnantes comprises entre -3.16 m et 2.70 m IGN69, à droite, la classification des pentes - secteur aval de la Loire, banc de Bilho

Les volumes oscillants de l'estuaire de la Loire

Le volume oscillant est défini comme le volume d'eau qui entre dans l'estuaire au cours d'une marée. Traditionnellement, il était évalué à l'embouchure de Saint-Nazaire grâce à des mesures de courants et de flux intégrées sur la durée d'une demi marée (flot).

L'objectif de cette exploitation est de recalculer ce volume de manière géométrique uniquement avec les hauteurs d'eau enregistrées en continu. La phase préalable consiste à élaborer un Modèle Numérique de Terrain Unifié (MNTU) représentant la géométrie de l'estuaire depuis le fond de la Loire jusqu'aux coteaux par agrégation des données topographiques existant sur le site : MNT bathymétrique, MNT laser, MNT photogrammétrique et BD ALTI® de l'IGN.

La méthode repose sur le croisement de ce MNTU et des Modèles Numériques de Lignes d'Eau (MNLE) créés à partir des enregistrements des hauteurs d'eau aux marégraphes. Ces MNLE représentent en 3 dimensions le plan d'eau formé par la Loire à un instant donné. Il s'agit d'une grille XYZ calculée sur la base de lignes d'eau créées perpendiculairement au sens d'écoulement du fleuve en chacun des sites de marégraphes (Deshoux et al., 2004).

Etant basée sur des points de mesures situés tout au long de l'estuaire entre Nantes et Saint-Nazaire, cette méthode présente l'avantage de permettre une subdivision géographique des calculs. Il est ainsi possible d'estimer les volumes oscillants non seulement depuis Saint-Nazaire mais également depuis chacun des dix autres points de mesure (chose impossible avec la méthode historique). On met ainsi clairement en évidence le phénomène

d'amortissement du volume de flot. Ce phénomène bien connu était autrefois calculé à partir de lois empiriques. Il est maintenant possible de le mesurer avec précision et dans n'importe quelle condition.

Perspectives et conclusion

De nombreux utilisateurs se révèlent pour exploiter les données de relief déjà acquises par la technique Lidar sur le littoral. Dans un souci de satisfaire les besoins les plus fins, ces données ont d'emblée été acquises à résolution spatiale et précision très fines, bien que certains usages comme ceux des modèles hydrodynamiques se contentent de résolution dégradée (1 pixel par 1000 m²). En revanche, bon nombre d'utilisateurs du domaine de la cartographie thématique s'habituent à une telle qualité et auront de plus en plus de mal à accepter une précision moindre.

Une cartographie fine de la zone côtière, telle qu'envisagée dans le projet Litto3D, objet de réflexions au niveau national, est une entreprise longue et coûteuse. Plusieurs alternatives existent : lever exhaustivement le littoral, à l'instar de l'orthophoto, de manière à assurer l'égalité des usagers (esprit du RGL, Référentiel à Grande échelle du Littoral) ou bien scinder l'espace en zones de priorités diverses, où les précisions, partant les techniques, seraient différentes. A ceci s'ajoute l'aspect du suivi : les utilisateurs du domaine de la géomorphologie s'accordent pour dire que de tels levés donnent un excellent "état zéro" de vastes zones mais pour le suivi, ils préfèrent s'en remettre à des levés très localisés et plus précis à l'aide des techniques du dGPS cinématique. Sans doute là aussi serait-il utile de définir une priorité sur quelques sites où le suivi aéroporté serait indiqué. Nul doute que cette technique, capable d'améliorer encore sa précision grâce aux progrès technologiques, a de beaux jours devant elle.

Remerciements

Les missions Lidar effectuées par l'Ifremer sur les sites mentionnées dans cet article ont été co-financées par la Fondation Total pour la Biodiversité et la Mer.

Références

- Aerovista**, 2002. *Campagne 1, géométrie des espaces intertidaux*. Rapport final d'étude, Loire Estuaire CMB, 76 p.
- CNIG**, 1993. *Proposition de spécifications générales pour les prises de vue aériennes destinées à des levés photogrammétriques réguliers*. Conseil National de l'Information Géographique, Paris.
- Deshoux V., Hochard C.**, 2004. *Submersibilités estuariennes : élaboration et exploitations du Modèle Numérique de Terrain Unifié de l'estuaire de la Loire*. In Bulletin SFPT "Téledétection et Hydrologie" (à paraître).
- 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.
- <http://www.ifremer.fr/rebent/>
- Laurentin, A.**, 2002. *Etude de faisabilité de topographie d'estran par photogrammétrie*. Rapport Ifremer, DEL/AO, Brest, 56 pages.
- Joinville O., Ferrand, B., Roux M.**, 2002. *Levé laser aéroporté : état de l'art, traitement des données et comparaison avec des systèmes imageurs*. In : Bulletin SFPT N°166, pp 72-81.
- Populus J., Barreau G., Fazilleau J., Kerdreux M., L'Yavanc J.**, 2001. *Assessment of the Lidar topographic technique over a coastal area*. CoastGIS'01, Second International Symposium on GIS and Computer Mapping, Halifax, June 2001.

Populus J., Laurentin A., Rollet C., Vasquez M., Guillaumont B., Bonnot-Courtois C., 2003. *Surveying coastal zone topography with airborne remote sensing for benthos mapping*. Presented at Earsel's SIG "Remote Seseing of the Coastal Zone" Workshop, Ghent, June 5-7, 2003.