



Etude du rivage par photogrammétrie aéroportée à très haute résolution spatiale. Exemple à Ouvéa, Nouvelle-Calédonie

Olivier COHEN¹, Pascal DUMAS², Matthieu LE DUFF², Michel ALLENBACH³

1 Université du Littoral Côte d'Opale – Laboratoire d'Océanologie et Géosciences (UMR LOG 8187), 189a av. Maurice Schuman 59140 Dunkerque, France.

olivier.cohen@univ-littoral.fr

2 Université de la Nouvelle-Calédonie, Centre des Nouvelles Études sur le Pacifique (EA 4242), BP R4, 98851 Nouméa, Nouvelle-Calédonie.

pascal.dumas@univ-nc.nc ; matthieu.leduff@yahoo.fr

3 Université de la Nouvelle-Calédonie, Laboratoire Insulaire du Vivant et de l'Environnement (EA 4243), Labex Corail, BP R4, 98851 Nouméa, Nouvelle-Calédonie. *michel.allenbach@univ-nc.nc*

Résumé :

Les rivages de la façade ouest d'Ouvéa (îles Loyauté, Nouvelle-Calédonie), connaissent par endroit une érosion côtière qui menace des enjeux économiques et culturels. Dans le cadre de deux projets de recherche, nous sommes amenés à étudier l'évolution du trait de côte : à long et moyen termes grâce à l'analyse diachronique de photographies aériennes et d'images satellites, à court terme grâce à des mesures *in situ* menées avec un topomètre (cadre gradué) et un récepteur GNSS différentiel de haute précision. En complément, nous réalisons des survols aériens avec un drone équipé d'un appareil photo numérique. Les clichés sont soumis à un traitement photogrammétrique qui permet de calculer des Modèles Numériques de Surface.

Un de nos premiers objectifs a été d'estimer la précision des résultats. Les modèles obtenus à partir du procédé photogrammétrique ont été comparés avec ceux calculés à partir de levés GNSS. Ces résultats permettent par exemple de décrire avec finesse l'évolution de la plage et de détecter l'impact d'infrastructures implantées sur l'estran sur le transit sédimentaire littoral.

Mots-clés : Nouvelle-Calédonie, Ouvéa, Drone, Photogrammétrie, Rivage, Erosion.

1. Introduction

Dans le cadre d'un projet du Ministère des Outremer ("Mise en place d'un réseau participatif de suivi du rivage : expérimentation dans les Iles Loyauté en Nouvelle-Calédonie") et d'un projet européen INTEGRE ("Etude des effets de l'érosion sur le trait de côte"), nous sommes amenés à analyser l'évolution du rivage sur l'île d'Ouvéa en Nouvelle-Calédonie grâce à différentes méthodes. Les plages lagonaires de cet atoll sont, par endroit, en érosion. Cette évolution a été déterminée sur le long terme, depuis

les années 50, grâce à l'analyse diachronique de photographies aériennes et d'images satellite à très haute résolution spatiale. A court terme, pendant la durée des projets, nous pratiquons des levés *in situ* avec un topomètre et avec un GNSS de haute précision qui permettent de construire des profils de plage et des Modèles Numériques de Terrain (MNT).

En complément, des levés photogrammétriques à très haute résolution spatiale, sont en cours d'expérimentation. Ils sont réalisés avec un capteur numérique embarqué sur un petit drone volant à basse altitude. Depuis quelques années, cette technique connaît un succès grandissant dans les sciences de la Terre : par exemple pour le suivi de l'évolution de versants (WESTOBY *et al.*, 2012 ; STÖCKER *et al.*, 2015) et pour celui de la dynamique de plages (CASELLA *et al.*, 2014 ; GONÇALVES & HENRIQUES, 2015 ; BRUNIER *et al.*, 2016).

On sait que la photogrammétrie aéroportée "classique", ayant recours à des vecteurs circulant entre 500 et 5000 m au-dessus du sol, fournit des résultats avec des marges d'erreur verticale très variables en fonction de la hauteur de vol, du relief et de la résolution spatiale des images. Cette marge d'erreur peut être métrique (1,5 m en montagne, MÜLLER, 2014) ou décimétrique (30 cm en zone côtière, THIELER & HAPKE, 2005). Cela n'est pas suffisamment précis pour détecter des formes de détail et des mouvements de faible amplitude sur les plages. Avec des levés LiDAR, on peut obtenir une marge d'erreur moindre de 10 à 15 cm convenable pour le suivi de l'évolution morphologique des plages (CRAPOULET *et al.*, 2015).

Le traitement photogrammétrique des clichés pris à partir de notre drone fournit des Modèles Numériques de Surface (MNS) d'une très grande finesse qui font apparaître des détails invisibles sur les MNT calculés à partir des données GNSS. Une de nos premières interrogations a porté sur le degré de précision de ces résultats obtenus avec notre matériel à faible coût : quelle résolution spatiale peut-on obtenir et surtout, quelle est la marge d'erreur verticale ? Sera-t-elle égale ou moindre que celles citées dans la littérature ? Nous avons donc entamé une démarche de validation des résultats et comparé ceux calculés à partir de la photogrammétrie à ceux issus du traitement des données GNSS. L'exemple présenté ici porte sur une portion longue de 120 m environ de la plage de la tribu de Heo au nord de l'île.

2. Présentation du site d'étude et enjeux

Ouvéa est la plus septentrionale des îles Loyauté, archipel à l'est de la Nouvelle-Calédonie. Elle se situe à environ 90 km des côtes de la Grande Terre (figure 1). Ouvéa est un atoll corallien en forme de croissant, basculé vers l'ouest. Sa superficie est de 132 km². La population était de 3374 habitants en 2014. La façade orientale de l'île est la plus élevée (point culminant à 43 m) ; les côtes à falaise y sont nombreuses ; un récif frangeant délimite un étroit lagon et protège le rivage des houles modales de secteur

sud-est. La façade ouest d'Ouvéa fait face au grand lagon. Elle est basse et très majoritairement bordée de longues plages de sables fins coralliens. Cette partie de l'île est particulièrement vulnérable aux aléas météo-marins (coups de vent fort de secteur ouest, cyclones et tsunamis). Les zones à risque définies comme étant situées à moins de 500 m du rivage et à une altitude inférieure à 10 m concentrent 44 % de la population (LE DUFF, 2013). On y trouve aussi 68% des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ex. : ateliers, stations-services), 67% des établissements recevant du public (ex. : écoles, mairie) et 90% des structures touristiques (ex. : hôtels et gîtes). Aux tsunamis et cyclones s'ajoute aussi par endroit l'érosion côtière. Celle-ci est aujourd'hui marquée à l'extrême nord de l'île à Hnyimék (jusqu'à -1,1 m/an de 1954 à 2012) et à proximité du pont de Léchine dans le sud (jusqu'à -1,4 m/an de 1976 à 2012). Au niveau des tribus de Heo et Takedji, la petite route côtière, la résidence du chef de tribu (chefferie), la maison commune et quelques cultures sont menacées. D'anciens bâtiments et murs, construits en haut de plage ont dû être abandonnés et s'écroulent. Ils perturbent le transit littoral sud-nord et semblent contribuer à l'érosion. La population est extrêmement sensible à celle-ci : pour elle, ce ne sont pas uniquement des enjeux économiques qui sont menacés, mais aussi son identité ; dans la culture kanak, la relation entre les hommes et leur terre est très intense (LE DUFF *et al.*, 2014). Ce secteur d'Ouvéa est donc à enjeux forts.

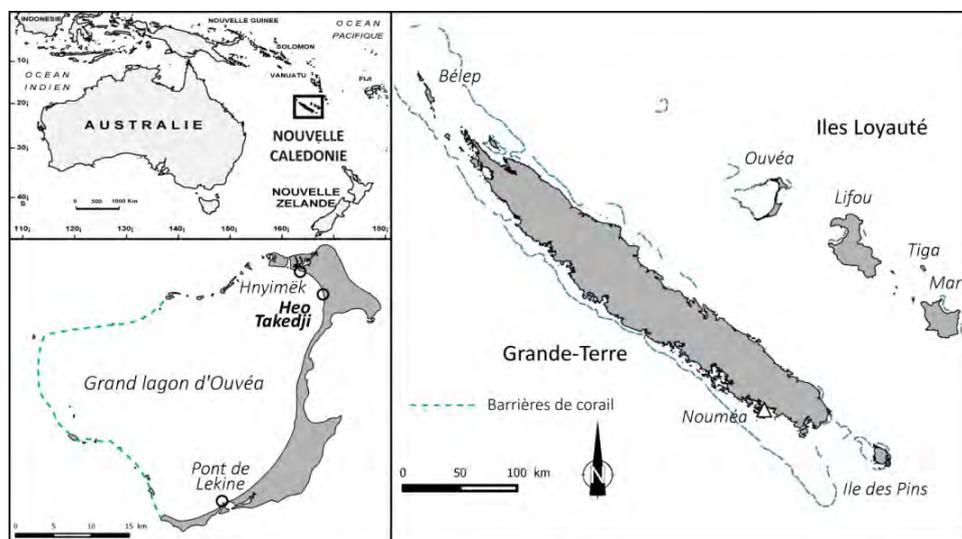


Figure 1. Localisation du site d'étude.

3. Méthodologie

Pour réaliser ces premières expérimentations, un matériel peu onéreux a été acquis. Il s'agit d'un drone quadricoptère DJI Phantom II. Le capteur est une caméra GoPro Hero 4 Black réglée en mode appareil photo avec un grand angle médium pour limiter la distorsion dans les bordures des images (effet fish-eye). Dans cette configuration, la résolution d'image est de 7 mégapixels. L'appareil est fixé sur une plateforme stabilisatrice (*gimbal*) qui permet de le maintenir à l'horizontale à tout instant, même si le drone subit de légers mouvements. Les clichés pris sont ainsi toujours nets. Enfin, un récepteur GNSS embarqué permet de connaître la position du quadricoptère avec une précision métrique ; il est aussi utile pour le suivi d'un plan de vol que l'on peut programmer avant le décollage.

Lors de la mission en juillet 2015, la plage a été survolée à marée basse. L'altitude de vol a varié entre 10 et 15 m. Cela a permis d'obtenir des images à très haute résolution spatiale. La vitesse de progression était lente (5 km/h environ) ; l'intervalomètre de l'appareil était programmé pour prendre une image toutes les 5 secondes ; cela garantit un très bon taux de recouvrement partout (plus de 90%), nécessaire à une restitution photogrammétrique de qualité. 341 photos ont été utilisées pour le traitement.

A la différence de la photogrammétrie classique, nous avons choisi, non pas de prendre des photographies verticales vers le nadir (sol), mais avec un angle de 30 à 45° par rapport à la verticale. Nous considérons notre zone d'étude comme un objet que nous photographions sous tous les angles afin de n'en manquer aucun détail. On peut ainsi même distinguer le haut de plage sous le feuillage des arbres le surplombant. En archéologie et en architecture, cette même procédure est utilisée pour rendre compte des faces verticales ou quasi-verticales des objets à modéliser en 3D (SAPIRSTEIN, 2016). 21 cibles au format A3, ont été déposées sur la plage, elles sont réparties de façon homogène, sous forme de petits transects du haut au bas d'estran (figure 2). Ces cibles servent au géoréférencement du modèle 3D dans le logiciel de traitement.

En parallèle, un semis de points a été levé au GNSS de haute précision (Trimble R4 en mode Real Time Kinematic). La position de cibles a été également relevée.

Le logiciel retenu pour le traitement photogrammétrique est Agisoft Photoscan. Son interface graphique permet une prise en main aisée ; il permet de vérifier les marges d'erreur à chaque étape de la chaîne de traitement ; les résultats sont facilement exportables dans des logiciels de Systèmes d'Information Géographique. Ce programme est utilisé dans le cadre d'autres études (ex. : CASELLA *et al.*, 2014 ; GONÇALVES & HENRIQUES, 2015 ; BRUNIER *et al.*, 2016). Les algorithmes de calcul utilisés sont donc similaires et nos résultats sont plus facilement comparables. La chaîne de traitement comporte 6 grandes étapes (tableau 1).

Tableau 1. Les étapes du traitement photogrammétrique.

Etapes	Remarques
• Importation, puis alignement automatique en 3D des images	341 photos utilisées. Plus de 90% de taux de recouvrement
• Détection d'un premier nuage de points peu dense ; géoréférencement du modèle 3D avec les cibles.	Géoréférencement en projection Lambert Nouvelle-Calédonie
• Calcul d'un nuage de points dense géoréférencé Suppression manuelle des arbres en haut de plage	Opération faite en qualité moyenne afin de limiter le temps de calcul. Densité obtenue : 132 points/m ² . Cela correspond à celle brute de levés LiDAR (Brunier et al., 2016)
• Calcul d'un modèle filaire (triangulation) du Modèle Numérique de Surface (MNS)	
• Placage de la texture photographique sur le MNS	
• Exportation du MNS sous forme de fichier grille vers d'autres logiciels (QGIS 2.8 et Surfer 12)	Résolution spatiale initiale (8,6 cm) convertie à 10 cm. Superficie du MNS = 1 ha (mer comprise)

4. Premiers résultats

La figure 2 juxtapose le MNT, calculé avec une triangulation de Delaunay (212 points levés au GNSS) et le Modèle Numérique de Surface issu de la photogrammétrie, obtenu avec la même interpolation.

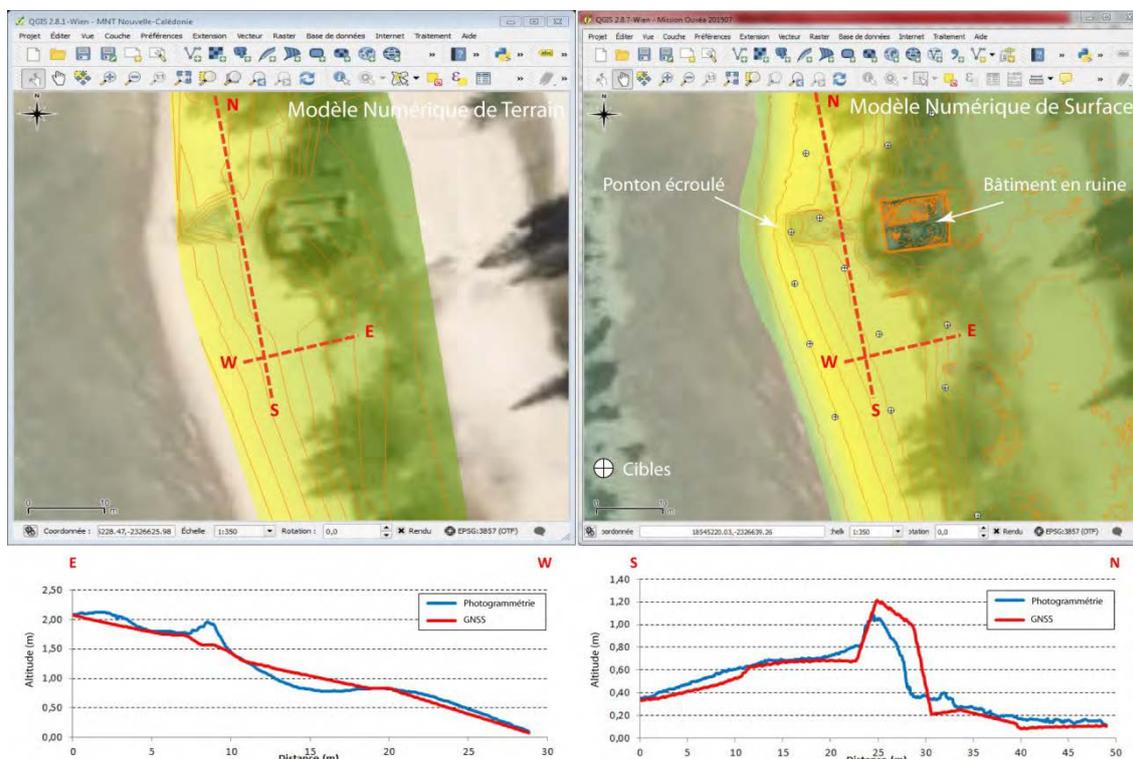


Figure 2. Extraits des Modèles Numériques de Terrain et Modèles Numériques de Surface.

Les deux sont à la même résolution spatiale. L'image de fond est l'orthophotographie créée à partir des clichés avec Photoscan. Sur le MNT, les courbes de niveau sont

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

cohérentes avec le relief de la plage, mais sont loin d'être assez précises pour bien cartographier l'ancien ponton en béton, maintenant effondré. Les courbes du MNS suivent de près ces blocs et le bâtiment en ruine en haut de plage.

Les profils transversaux (figure 2 en bas à gauche) extraits des MNT et MNS montrent des résultats similaires, mais celui du MNT est plus schématique et celui du MNS plus détaillé : on y distingue une berme de haut de plage et un replat de mi-estran qui n'apparaissent pas dans les résultats GNSS (figures 2 et 3). Cette comparaison permet également de détecter l'influence du ponton écroulé sur la plage : sur les deux types de profils longitudinaux, on remarque qu'au sud, la plage est plus haute de 20 cm qu'au nord. Ce ponton joue un rôle d'épi perturbant le transit sédimentaire sud-nord. Cela est prouvé par la comparaison de la zone commune (2200 m² environ, secteur du ponton et bâtiment en ruine exclu) des MNT de mars et juillet 2015, ainsi que du MNT de mars et du MNS de juillet (figure 4) : la partie sud est en accrétion, la partie du nord du ponton est en érosion, surtout au niveau du talus de haut estran.

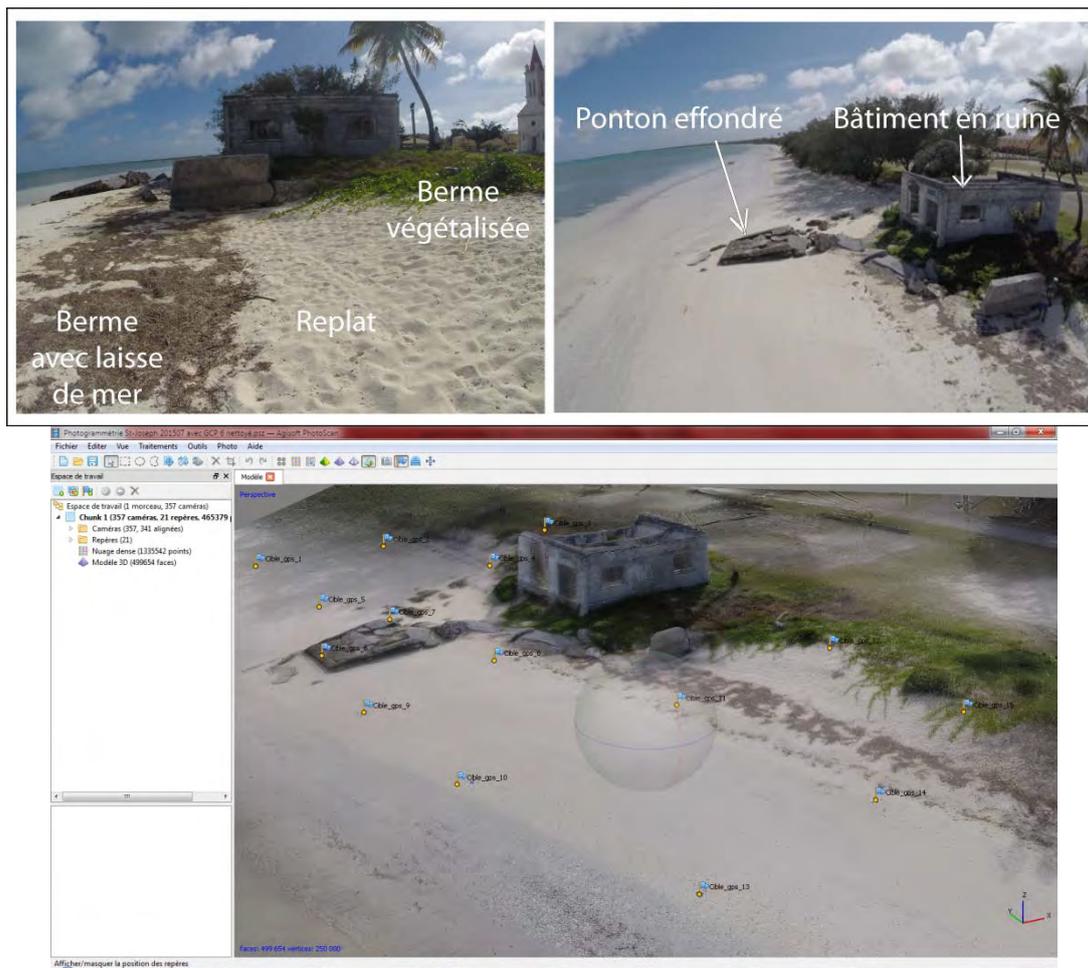


Figure 3. Photographies et modèle 3D de la partie centrale de la zone d'étude.

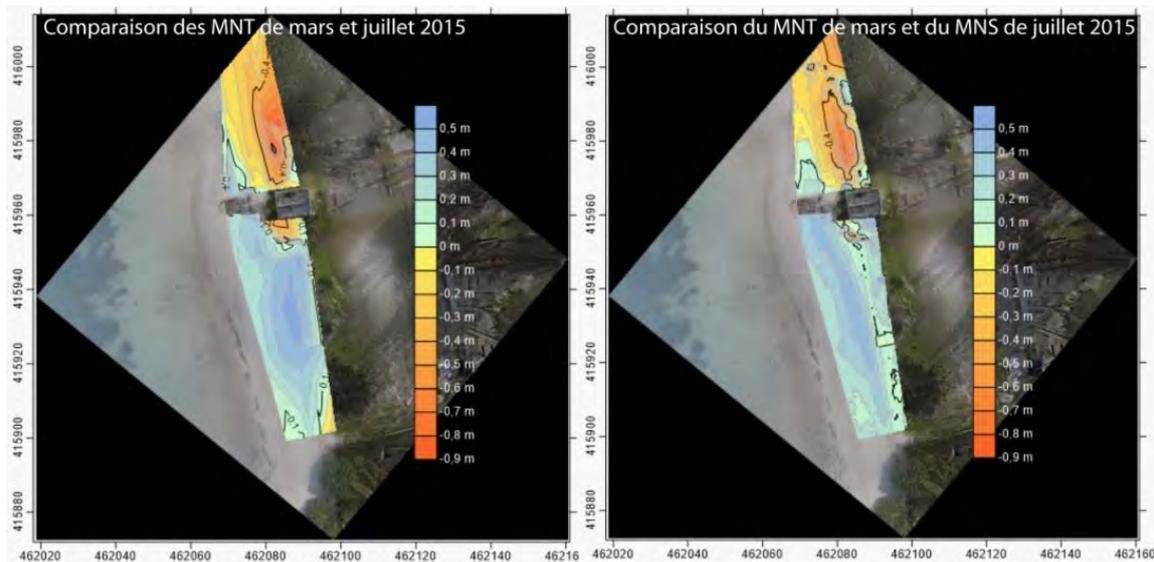


Figure 4. Evolution de la plage de mars à juillet 2015.

5. Discussion et conclusion

Une question essentielle se pose maintenant : les constatations faites sont-elles le résultat d'une réelle évolution de la plage ou de marges d'erreur du MNS ? Pour le savoir, les résultats issus des mesures GNSS et de la photogrammétrie ont été comparés. Au niveau des seules cibles de géoréférencement, la différence moyenne est de 2 cm (minimum 1 cm, maximum 3 cm). Le MNT est en moyenne 4,7 cm plus bas que le MNS. Dans 50% des cas, les différences s'échelonnent entre -6 et +5 cm (figure 5). Ce sont là des résultats d'une précision similaire à celle obtenue avec la même méthode par GONÇALVES & HENRIQUES (2015) et BRUNIER *et al.* (2016) en domaine littoral, et d'une précision meilleure que celle des levés LiDAR. Des différences beaucoup plus grandes existent cependant : les valeurs négatives (MNT > MNS, dans les cercles sur la figure 4) les plus fortes se trouvent au niveau d'un petit buisson contre le mur sud du bâtiment en ruine (-0,6 à -0,7 m), d'un mur (-1,42 m) et de la souche d'un arbre que nous n'avons pas bien supprimé dans la troisième étape du traitement photogrammétrique (-0,96 m). Cette dernière valeur influence l'interpolation tout autour. La zone de valeurs positives (MNT environ 30 cm plus haut que le MNS) au sud du vieil édifice se situe exactement sur le talus de haut de plage. Nous pensons qu'ici le MNT est trop schématique pour rendre compte du relief réel (zone avec une densité moindre que la densité globale, faible déjà).

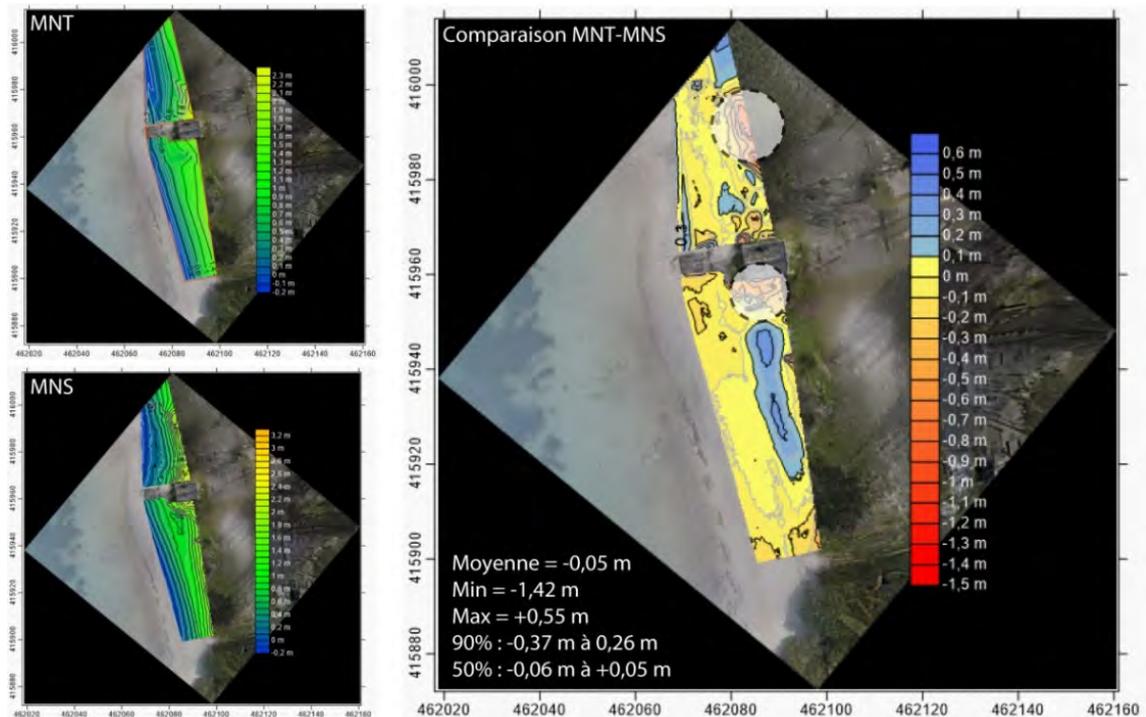


Figure 5. Comparaison du MNT et du MNS de juillet 2015.

D'autres marges d'erreur sont aussi à prendre en compte (figure 6) : celles des levés GNSS sont faibles (2 cm en moyenne en précision verticale, qui diminue à proximité des arbres) et celles liées au traitement photogrammétrique lui-même ; 1,2 cm en moyenne, variant de -2,5 à 10,9 cm, erreur augmentant du centre de la scène vers la périphérie. Mieux vaut donc traiter une zone plus grande que le site d'étude, puis retenir les données du centre et supprimer celles vers l'extérieur. Au final, cette technique est très intéressante, notamment dans les zones nues dépourvues de végétation où les résultats des deux méthodes sont très convergents. Dans les autres secteurs, on ne compare pas la même chose (sol et végétation) et les différences sont plus fortes. Un matériel d'entrée de gamme peut donc être suffisant pour travailler sur de petites zones. Par la suite, pour mieux valider la précision des traitements photogrammétriques, c'est à la stationnarité de points fixes (ex : le vieux bâtiment) qu'il faudra s'intéresser : si celle-ci est avérée, cela sera le signe de la fiabilité de la méthode. Lors des comparaisons, les résultats seront donc la traduction d'évolutions (plage, végétation) ; même si leurs altitudes ne sont pas parfaitement exactes dans l'absolu, les levés photogrammétriques pourront être interprétés de façon relative (variations de l'altitude et de volume).

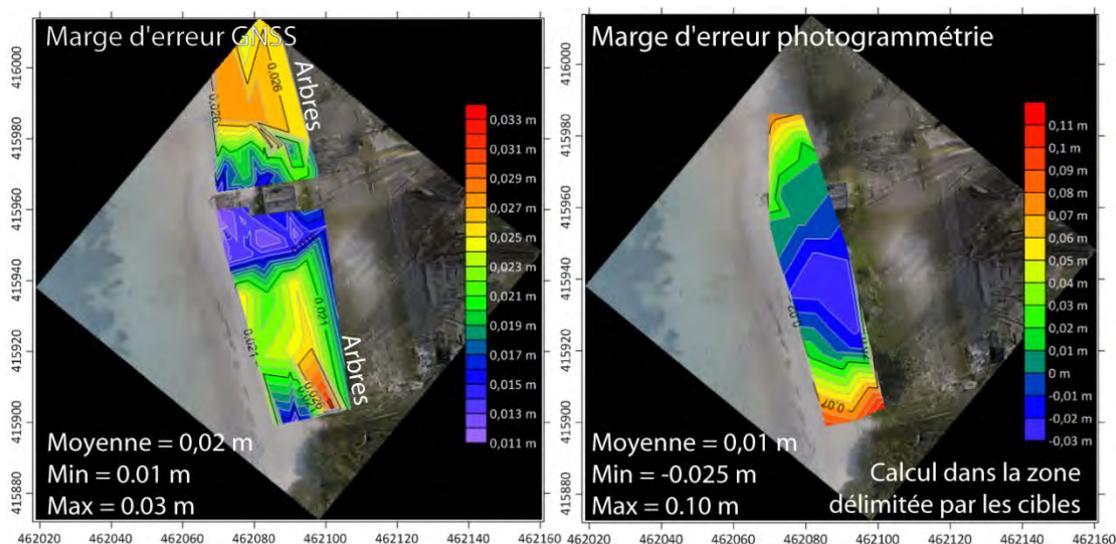


Figure 6. Marges d'erreur technique des levés GNSS et de la photogrammétrie.

6. Références bibliographiques

- BRUNIER G., FLEURY J., ANTHONY E. J., GARDEL A., DUSSOUILLEZ P. (2016). *Close-range airborne Structure-from-Motion Photogrammetry for high-resolution beach morphometric surveys: Examples from an embayed rotating beach*. *Geomorphology*, Vol. 261, pp 76-88. <http://dx.doi.org/j.geomorph.2016.02.025>
- CASELLA E, ROVERE A., PEDRONCINI A., MUCERINO L., CASELLA M., CUSATI L.A., VACCHI M. FERRARI M., FIRPO M. (2014). *Study of wave runup using numerical models and low-altitude aerial photogrammetry: A tool for coastal management*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 149, pp 160-167. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2014.08.012>
- CRAPOULET A., HEQUETTE A. LEVOY F., BRETEL P. (2015). *Evaluation de l'évolution du trait de côte et du bilan sédimentaire littoral en baie de Wissant (nord de la France) par LiDAR aéroporté*. *Géomorphologie, Relief, Processus, Environnement*, Vol. 21(4), pp 313-330. <http://dx.doi.org/10.4000/geomorphologie.11146>
- GONÇALVES J.A., HENRIQUES R. (2015). *UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 104, pp 101-111. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009>
- LE DUFF M. (2013). *Le risque tsunami aux îles Loyautés. Bilan des actions mises en œuvre sur la période 2009-2013*. Rapport pour le Haut-Commissariat de la Nouvelle-Calédonie, Nouméa, 26 p.
- LE DUFF M., DUMAS P., ALLENBACH M. (2014). *Quelle gouvernance des risques littoraux aux îles Loyauté (Nouvelle-Calédonie), dans le cadre du réchauffement climatique ?* Actes du colloque Cocorisco, Brest, juin 2014, pp 429-436.
- MÜLLER J., GÄRTNER-ROER I., THEE P., GINZLER C. (2014). *Accuracy assessment of airborne photogrammetrically derived high-resolution digital elevation*

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

models in a high mountain environment. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 98, pp 58-69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.09.015>

SAPIRSTEIN P. (2016). *Accurate measurement with photogrammetry at large sites.* Journal of Archeological Science, Vol. 66, pp 137-145. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2016.01.002>

STÖCKER C., ELTNER A., KARRASH P. (2015). *Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry - A case study from Andalusia, Spain.* Catena, Vol. 132, pp 1-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.04.004>

THIELER R.E., HAPKE C.J. (2005). *Photogrammetry.* In SCHWARTZ M (éd) Encyclopedia of Coastal Science. Springer, pp 764-769.

WESTOBY M.J., BRASINGTON J., GLASSER N.F., HAMBREY M.J., REYNOLDS J.M. (2012). *Structure from motion photogrammetry: A low-cost, effective tools for geoscience application.* Geomorphology, Vol. 179, pp 300-314. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>