

Surveillance par drone des digues à talus



Figure 1. Digue sud de protection du port de Leixões au Portugal, avec le nouveau terminal des croisières

© Francisco Piqueiro

■ Maria João HENRIQUES - version française : Laurent POLIDORI

Les ports et autres infrastructures construits sur des côtes exposées à de fortes houles ont besoin d'être protégés. Une telle protection peut être obtenue par des digues ou des brise-lames. Les digues à talus ont en général une bonne résilience pendant les événements les plus agressifs. Un endommagement des digues affaiblit la structure et peut entraîner la perte de la capacité de protection, ce qui peut avoir des conséquences environnementales et économiques très graves. Pour cette raison, les digues doivent être soumises à une surveillance régulière pour la détection des anomalies. Cet article présente quelques exemples de l'utilisation de drones dans la surveillance de la sécurité de ces structures, et décrit en particulier deux vols menés avec des drones et quelques possibilités d'extraction de données pour obtenir des informations d'intérêt pour les responsables de la sécurité.

■ MOTS-CLÉS

Digue, brise-lame, vague, drone, surveillance, sécurité, ortho-photo, nuage de points.

La construction de structures protectrices en zone côtière est une pratique ancienne (Viret, 2005 ; de Graauw, 2014), mais sa nécessité s'est considérablement accrue au cours des dernières décennies en raison de la croissance de la popu-

lation et des activités économiques dans la bande côtière. Par ailleurs, des facteurs naturels tels que l'élévation du niveau de la mer et l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes océaniques contribuent également à la nécessité de construire

de nouvelles structures de protection du littoral ou de renforcer celles qui existent déjà (Becker et al., 2013). Il existe plusieurs types de structures de défense. Les digues à talus sont celles qui résistent le mieux aux tempêtes intenses. La surface de ces structures subit l'impact direct des vagues, aussi leur déformation peut-elle conduire à un affaiblissement de leur capacité protectrice et amener à la destruction de tout ou partie de la digue. Très souvent, la détérioration d'une digue est progressive, ce qui justifie la mise en œuvre d'une observation systématique afin de détecter des anomalies à un stade précoce, lorsque la réparation est moins chère, plus rapide et peut-être moins perturbatrice.

La couche superficielle d'une digue de talus est constituée par des blocs. Les changements dans la position de

ces blocs peuvent affaiblir la structure, d'où l'intérêt de recourir à des méthodes d'observation capables de détecter de tels changements. Dans les digues, les zones les plus exposées et où les changements les plus importants peuvent donc se produire, sont situées sur le côté de la mer, où les techniques topographiques sont plus difficiles à mettre en œuvre. Les techniques aériennes, couramment utilisées dans les levés, peuvent constituer une solution adaptée. Le développement récent des drones (plates-formes aériennes sans pilote) offre une alternative intéressante, permettant d'obtenir des produits de qualité acceptable à un coût relativement faible. Ces produits – ortho-mosaïques et nuages de points – fournissent des données sur la surface de la digue qui peuvent constituer une aide précieuse pour la prise de décision par les responsables de la sécurité de l'ouvrage.

Cet article vise à montrer les avantages de l'utilisation d'un drone dans la surveillance des digues à talus. Les caractéristiques de ces ouvrages sont d'abord présentées pour une meilleure compréhension de leur structure. Deux levés aériens effectués par drone sur des digues du Portugal sont ensuite décrits. La troisième partie présente les produits obtenus et montre comment les informations sont extraites au moyen d'un logiciel *open-source*. Enfin, la dernière partie présente une synthèse de la mise en œuvre expérimentale du levé aérien sur des digues, et les conclusions de l'étude.

Digues à talus

Les digues à talus sont les structures de protection les plus usuelles dans les zones littorales qui sont fréquemment exposées à de violentes tempêtes de mer. Comme le montre la *Figure 2*, une digue à talus classique comporte un noyau entouré par un filtre de matière fine (sous-couche) avec une partie extérieure (couche protectrice ou carapace) comprenant des blocs de pierre ou de béton. La fonction du filtre est d'empêcher la fuite de matière fine parmi des blocs. Les digues ont souvent, le long de la crête, une structure appelée superstructure, et les digues de protection des ports ont souvent, côté terre, des quais et autres structures permettant les activités maritimes et portuaires.

La protection de la digue est réalisée par les blocs de la couche externe, dont la principale fonction est de dissiper l'énergie des vagues et/ou de réfléchir cette énergie vers la mer. Différents types de blocs de surface sont généralement utilisés, qui diffèrent autant par le matériau utilisé (pierre ou béton) que par la forme. Les blocs de béton sont plus coûteux mais ils ont une plus grande capacité de protection de la structure en raison de leur forme et de leur poids. C'est pourquoi ils sont installés dans les zones exposées aux vagues les plus intenses.

Une modification de la position des blocs, en fragilisant la couche de protection, conduit à exposer les couches internes, à permettre le franchissement de la crête, et à endommager davantage la digue en cas de tempête. C'est

pourquoi des visites d'inspection sont organisées notamment pour identifier les zones où la couche externe a subi des changements.

Levés aériens par drone sur des digues

Cette section décrit deux vols d'essai effectués sur la digue d'Ericeira et sur les deux digues de Portimão, au Portugal. La *Table 1* présente les principales caractéristiques des structures et des vols. Afin de préserver un nécessaire recouvrement entre les prises de vues, chaque vol est constitué de quatre bandes.

■ Ericeira

La digue d'Ericeira est située dans une zone très exposée à la houle atlantique, qui provient de l'ouest ou du nord-ouest. La structure d'origine, construite dans les années 1970 pour protéger un port de pêche artisanale, s'est avérée être sous-dimensionnée pour la houle qui atteignait la côte. Des études de dimensionnement menées dans les années 2000 avec un modèle physique ont permis de déterminer la meilleure solution pour une nouvelle digue, qui a été reconstruite à la fin de la même décennie (*Figure 3 et Figure 4*).

La configuration de la côte (*Figure 3*), les falaises, un village très compact avec quelques grands bâtiments, ont conduit à effectuer le vol (maintenu à une hauteur constante) à une altitude élevée de 185 m en raison de l'emplacement du point de départ, un terrain plat avec broussailles, situé à la périphérie du village, à l'altitude de 90 mètres environ. Pendant le vol, effectué un jour très venteux, la transmission des données a subi des défaillances, très probablement dues à la présence d'antennes de transmission de la police maritime et des pompiers à la proximité du port. La programmation du vol puis le traitement des données ont été réalisés

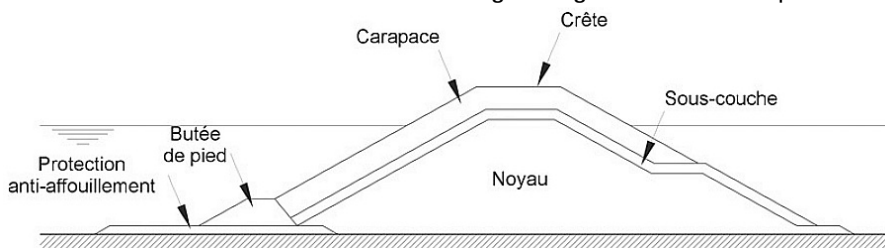


Figure 2. Structure type d'une digue à talus (CIRIA et al., 2009)

Digue	longueur	direction	drone imageur	hauteur de vol	temps de vol	nombre de photos	cadence
Ericeira	440 m	Nord-Sud	SenseFly Swinglet CAM+ Canon IXUS	185 m	5 min	72	4 s
Portimão	ouest	805 m	DJI Phantom 3 Pro	80 m	11 min	285	2 s
	est	645 m		80 m	8 min	204	

Table 1. Caractéristiques des digues et des vols



Figure 3. Digue d'Ericeira lors de la reconstruction



© playocean.net

Figure 4. Digue d'Ericeira, superstructure flanquée de blocs de pierre et, côté mer, de tétrapodes

avec les logiciels de la société SenseFly, Emotion et PostFlight Earth 3D.

■ Portimão

Près de la ville de Portimão, située sur la côte sud du Portugal, deux digues ont été implantées pour protéger l'embouchure de l'Arade, ce qui a permis le développement de l'activité portuaire (commerciale, de pêche et de loisir). Les digues ont été érigées dans les années 1950, et dans les années 1990, des travaux ont été réalisés pour augmenter leur résistance et réduire le franchissement (Figure 5). Le vol a été

effectué par temps calme, sans vent et par mer calme, ce qui a permis d'obtenir de bonnes photos y compris des blocs immergés. Le plan de vol puis le traitement ont été réalisés avec le logiciel Pix4D (Capture et Mapper, respectivement).

■ Points d'appuis pour les levés aériens

Sur les trois digues, des points d'appui ont été localisés par GNSS (Henriques et al., 2014). Après la détermination des coordonnées cartographiques, une translation de +2,00 m a été appliquée



Figure 6. Plaque de couverture de boîtiers de protection et son image de la couverture (les points jaunes appartiennent au nuage de points)

aux altitudes pour les adapter au zéro hydrographique. Sur la digue d'Ericeira on a choisi un coin de la plupart des plaques recouvrant les boîtiers de protection du réseau électrique (Figure 6), tandis qu'à Portimão on a peint des cercles sur quelques blocs. Pour des raisons de sécurité, les points d'appui ont été définis sur la crête ou à proximité immédiate. Un contrôle de qualité effectué avec des coordonnées de points identifiés dans l'ortho-mosaïque et dans le nuage de points (points connus en coordonnées par GNSS mais non utilisés pour le calage) a indiqué une exactitude légèrement meilleure que le décimètre en planimétrie, et moins bonne en altimétrie, environ 2 décimètres, précisions suffisantes pour mesurer un déplacement significatif supérieur à la taille du bloc.



Figure 5. Digue ouest à Portimão (à gauche en 1952 pendant la construction, à droite en 2012 après les travaux de consolidation)

Ortho-mosaïques et nuages de points

Dans les ortho-mosaïques, qui résultent de l'assemblage de photos ortho-rectifiées, on peut facilement identifier les blocs et détecter certaines anomalies. La Figure 7 présente un extrait de l'ortho-mosaïque de la digue est de Portimão. Cette image montre que les blocs de béton, de forme rectangulaire, situés côté mer à proximité de la crête, ne sont pas protégés par des blocs de pierre, et que beaucoup de ceux-ci se retrouvent du côté opposé.





Figure 7. Détail de l'ortho-mosaïque sur la digue est de Portimão, un parallépipède 2 m x 3 m

Pour la digue d'Ericeira il était possible d'accéder aux plans et profils transversaux des ouvrages, et de construire un nuage de points à partir de ces données. La connaissance de la hauteur de la marée à Ericeira a permis d'exclure du nuage les points qui devraient se trouver au-dessous de la surface de l'eau. Pour visualiser les différents matériaux (Figure 8 et 9) on a attribué une couleur à chaque point :

- A) en vert, les tétrapodes (poids 300 kN),
- B) en orange, les cubes Antifer (poids 400 kN),
- C) en marron, les blocs de pierre (poids de 90 à 120 kN),
- Q) en gris, le béton de la jetée et de la crête.

Quand on superpose les deux nuages (Figure 10) on remarque que près de la superstructure, dans la zone où le

remblai de la digue est le plus haut, les blocs de béton ont une altitude inférieure à celle reportée en 2010. De l'autre côté, les blocs de pierre ont peu bougé. Ce n'est pas surprenant si l'on tient compte du fait que ces blocs sont placés dans une zone moins exposée aux vagues. Ce genre de comportement est prévisible dans les travaux de terrassement. On observe par ailleurs, à la base visible de la structure, près de l'extrémité de la jetée, une accumulation des blocs, et dans la zone de transition entre les tétrapodes et les blocs de pierre, une accumulation de ces derniers. Ce phénomène d'accumulation, révélé par une augmentation de l'altitude, est cohérent avec la direction de la houle dans cette partie de la côte. Pour évaluer les différences d'altitude on a construit au moyen du programme

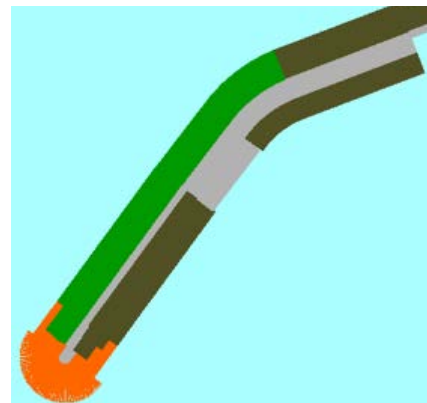


Figure 9. Digue d'Ericeira, nuage de points issu des plans de 2010.

- tétrapodes
- cubes Antifer
- blocs de pierre
- béton

Cloudcompare une image raster avec une maille de 50 cm. Pour calculer les différences des altitudes entre les images raster on a utilisé le module Calculator du programme de QGIS. La Figure 11 présente l'image résultante : des couleurs jaunes ont été attribuées à des différences négatives (la surface actuelle est plus basse que le modèle de 2010), et des couleurs bleues à des différences positives.

En ce qui concerne les digues de Portimão, on ne disposait pas d'informations sur les ouvrages exécutés. On a donc effectué une étude des déformations relatives des deux structures avec des profils, dessinés avec des données générées par QGIS.

Le graphique de la Figure 12 présente une section de la digue ouest (O) et deux de la digue est (E-1 et E-2), la section E-1 ayant été réalisée dans une zone exposée visible dans la Figure 7. Côté terre (à gauche sur la Figure 12) les deux digues sont très similaires. Côté mer on peut voir que, dans la zone E-1 les blocs de béton ne sont pas protégés, contrairement à ce qu'il se passe en O et E2. Les mesures effectuées permettent d'estimer que, dans ce lieu, le volume de matière enlevée était de 500 m³.

Mise en œuvre expérimentale des vols au-dessus des digues

Les zones côtières sont souvent très exposées aux vents. Pour cette raison les modèles de drones à voilure fixe, plus aérodynamiques et capables de



Figure 8. La digue d'Ericeira et les différents matériaux de surface (A : tétrapodes, B : cubes Antifer, C : blocs de pierre, Q : jetée et superstructure en béton)

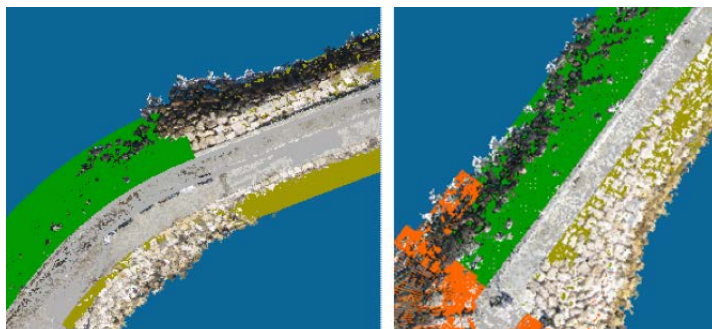


Figure 10. Superposition du nuage de 2010 avec le nuage obtenu en 2013

Environnement du LNEC pour l'information sur le comportement des digues.

Contact

Maria João HENRIQUES
mjoao@lnec.pt

Références

Becker, A.H., Acciaro, M., Asariotis, R. et al. (2013) *A note on climate change adaptation for seaports: a challenge for global ports, a challenge for global society*. Climatic Change 120: 683. doi:10.1007/s10584-013-0843-z

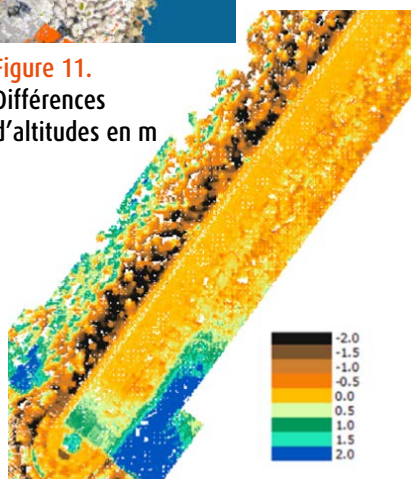
CIRIA, CUR, CETMEF (2009) *Guide Enrochement. L'utilisation des enrochements pour les ouvrages hydrauliques*. Version française du Rock Manual. Chapitre 6. CETMEF, Compiègne. <http://www.kennisbank-waterbouw.nl/DesignCodes/rockmanual/Chapitre6.pdf>

de Graauw, A. (2014) *The long-term failure of rubble mound breakwaters*, Méditerranée [Online], Varia. URL : <http://mediterranee.revues.org/7078>

Henriques, M.J. ; Braz, N. ; Roque, D. ; Lemos, R. ; Fortes, C.J.E.M. (2016). *Controlling the damages of physical models of rubble-mound breakwaters by photogrammetric products - Orthomosaics and point clouds*, Proceedings of the 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring, Vienna. URL: http://www.fig.net/resources/proceedings/2016/2016_03_jisdms_pdf/reviewed/JISDM_2016_submission_50.pdf
Viret, J. (2005) *Les "murs de mer" de la côte levantine*, Méditerranée [Online], 104 | 2005. URL : <http://mediterranee.revues.org/2052> ; DOI : 10.4000/mediterranee.2052

voler avec des vents plus forts, sont plus adaptés pour les levés aériens dans ces zones. Cependant ils ont une limitation très importante : ils exigent un endroit plan pour atterrir, de préférence avec de la végétation au ras du sol. A proximité de la plupart des digues on trouve bien des zones plates (plages ou plates-formes) mais les matériaux de ces surfaces (sable ou béton) peuvent endommager irrémédiablement le drone lors de l'atterrissage. En revanche, un pilote ou programmeur de vol d'un drone multicoptère n'aura pas de mal à trouver un endroit approprié pour l'atterrissage vertical et sans frottement, ne laissant que les pieds en contact avec la surface. Comme dans la majorité des vols, la trajectoire a été pré-programmée et on a opté pour un vol en mode automatique. Comme il y a souvent de fortes rafales de vent, le pilote doit suivre le vol visuellement pour pouvoir agir, en basculant en mode manuel si nécessaire. En ce qui concerne le choix de l'heure, le vol a été effectué aux alentours de midi afin de minimiser les zones qui sont ombragées par les blocs, et en préférant les heures de marée basse afin de maximiser la surface émergée.

Figure 11. Différences d'altitudes en m



points, permettent d'obtenir pour un coût réduit des informations sur l'évolution de la couche de protection des digues à talus. L'analyse des produits obtenus permet de détecter et surtout de quantifier les modifications des surfaces émergées, apportant une précieuse aide à la décision pour les responsables de la sécurité de ces structures. Cependant, l'étude approfondie d'une digue ne peut être complète sans effectuer également un levé des parties immergées, une procédure qui est encore très coûteuse et qui, pour cette raison, est seulement réalisée dans des cas exceptionnels. ●

Conclusions

Les drones et les logiciels de traitement de données capables de générer des ortho-mosaïques et des nuages de

Remerciements

L'auteur tient à remercier les entreprises Sinfic et Geosense pour la mise à disposition des levés aériens et l'Unité des Ports et des Structures Maritimes du Département Hydraulique et

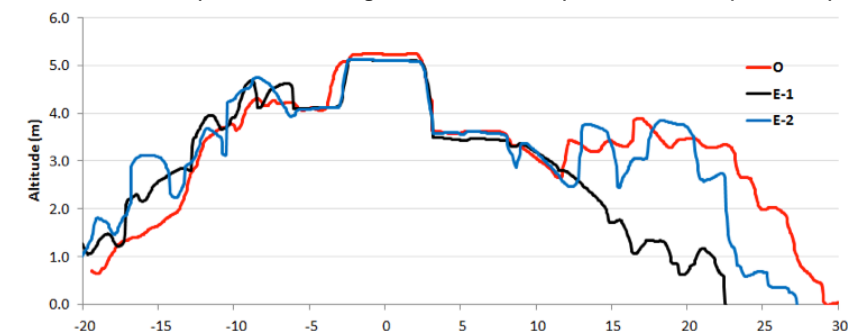


Figure 12. Profils de digues de l'ouest et de l'est

ABSTRACT

Ports and other infrastructures built along the coast and exposed to high waves need to be protected. Such protection can be obtained by breakwaters. Damage of breakwaters weakens the structures and may result in loss of protection capacity, which can cause environmental and serious economic consequences. So these structures must be subject to regular monitoring for detection of anomalies. Some examples of the use of drones in monitoring of these structures are shown, particularly two flights conducted with drones are described as well as some possibilities of data retrieval.