



## Méthode innovante d'inspection des carapaces de digues par l'utilisation de jumeaux numériques – retour d'expérience de deux chantiers

Cyril GIRAUDEL<sup>1</sup>, Steven LE BARS<sup>2</sup>, Alberto GUTIERREZ<sup>1</sup>,  
Timothée LAUNAY<sup>2</sup>, Vincent MACAIGNE<sup>2</sup>

1. ARTELIA, 6 rue de Lorraine, 38130 Echirolles, France.

[cyril.giraudel@arteliagroup.com](mailto:cyril.giraudel@arteliagroup.com)

2. ID OCEAN, Hangar D20 Village des Mascareignes 2, 97420 Le Port, Réunion, France.

[contact@idocean.re](mailto:contact@idocean.re)

### Résumé :

Les infrastructures maritimes sont de plus en plus sollicitées face au changement climatique. C'est donc une nécessité pour les constructeurs mais aussi les exploitants de ces infrastructures de les maintenir dans le meilleur état possible pour ne pas réduire leur durée de vie, voire de l'augmenter face à un climat toujours plus imprévisible. Les carapaces de protection des ouvrages maritimes sont des éléments souples qui se déforment dans le temps au gré des sollicitations qu'ils reçoivent.

La méthodologie communément employée afin de réaliser les inspections consistait à réaliser une visite basée sur des inspections dites visuelles hors d'eau et utiliser des plongeurs pour réaliser les auscultations de la partie sous-marine. Cette méthodologie mise en œuvre de nombreuses fois a montré ses limites non seulement quand la visibilité est mauvaise mais également elle ne permet pas de se faire une véritable idée d'ensemble de la carapace. Par ailleurs cela nécessite l'utilisation d'une équipe de plongeurs sur site pendant toute la durée de l'inspection qui peut aller de quelques heures sur un ouvrage très court à plusieurs semaines sur un ouvrage de grande ampleur. Enfin l'interprétation des images vidéo ou photos quand elles sont disponibles reste complexe et sujette à interprétation.

Afin de faciliter la réalisation des inspections sous-marines des carapaces, il était important de trouver une méthode qui soit rapide, fiable et permette de rassembler les informations factuelles objectives nécessaires à l'inspection détaillée de ces ouvrages en blocs monocouche et autres ouvrages en blocs artificiels avec certaines limitations plus importantes.

C'est dans ce contexte qu'une méthode innovante d'inspection des carapaces a été mise au point, pour scanner et reproduire fidèlement les carapaces en un jumeau numérique 3D haute qualité. Un logiciel spécial appelé Seabim® permet de reconnaître les formes des blocs dans des nuages de points haute densité.

La réalisation de jumeau numérique des carapaces permet en effet de vérifier tous les paramètres essentiels de stabilité des blocs, non seulement sur de petits ensembles mais

## *Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance*

également sur des zones très étendues. C'est ce jumeau numérique qui permet d'avoir des informations factuelles sur la densité de pose par exemple et qui permet une analyse complète et détaillée des carapaces.

L'article présente les résultats de deux projets pilotes très différents l'un de l'autre. Le premier est situé dans le Sultanat d'Oman où les digues sont protégées par 32 000 CORE-LOC™ de petite taille (1 à 6 m<sup>3</sup>) réalisé en 2019 et l'autre sur un ouvrage plus court avec des gros blocs ACCROPODE™ I (12 et 16m<sup>3</sup>) et réalisé en l'an 2000. L'article présente les méthodologies d'acquisition de données, les verrous techniques levés et les nouvelles méthodes d'analyse de carapaces des digues. Enfin l'article revient sur ce retour d'expérience en mettant en lumière les avancées techniques, méthodologiques et les bénéfices en termes de gestion patrimoniale pour les opérateurs d'infrastructures littorales.

### **Mots-clés :**

Gestion patrimoniale, Digue, Bathymétrie, Inspection, Travaux maritimes.

### **1. Introduction**

Les ouvrages maritimes sont des structures soumises aux fluctuations de la météo et du climat. Les digues à talus sont les ouvrages les plus utilisés pour protéger aussi bien des infrastructures portuaires que les côtes littorales. Les digues sont le souvent protégées par des carapaces, qu'elles soient réalisées en blocs naturels ou en blocs artificiels. Ces ouvrages sont malléables et en constante évolution car ils se modèlent en fonction des événements climatiques.

Un véritable changement de vision de ces ouvrages maritimes s'opère actuellement chez les acteurs de la construction. En effet, ces ouvrages subissent de plein fouet les conséquences du changement climatique et nombre d'entre eux construits il y a plusieurs décennies montrent des signes de fatigue. Jusqu'alors, il n'était pas coutume de réaliser des actions de maintenance préventive de ces ouvrages et il fallait attendre que des dégâts importants se déclarent pour que des actions d'inspection et de réparation soient mises en œuvre. De plus, d'autres acteurs tels que les assureurs s'intéressent à l'évolution des conditions climatiques et ses effets sur les infrastructures. Ils sont de plus en plus regardants sur les conditions d'indemnisation relatives à ces ouvrages ou à ce qu'ils protègent dans le contexte du réchauffement climatique qui ne cesse d'accroître la pression sur les infrastructures existantes.

La pérennisation des ouvrages existants est un impératif à la fois économique et écologique. La construction de nouveaux ouvrages est fortement consommatrice de ressources et émettrice de carbone. Il est donc nécessaire de limiter ces impacts en assurant la maintenance des ouvrages existants en état de fonctionner et en les améliorant afin qu'ils puissent assurer leur fonction dans les décennies à venir. L'inspection des

ouvrages est donc une nécessité impérieuse afin d'anticiper la maintenance préventive de ces digues (AUBEL & BESCOND, 2002 ; CEREMA, 2014).

Les deux chantiers décrits ci-après ont été construits avec des blocs dits monocouche ; c'est-à-dire que la fonction primaire de protection est assurée par une seule et unique couche de blocs en béton non armés comme les blocs ACCROPODE™ (figure 1) ou CORE-LOC™ (figure 2). Ces éléments en béton ont la capacité de s'imbriquer les uns avec les autres afin d'obtenir une forte cohésion et assurer la stabilité. Si de nombreux types de bloc existent c'est l'ACCROPODE™ né en 1980 qui a ouvert la voie à ces nouvelles techniques qui sont très largement utilisées de nos jours. Ils ont la réputation d'être à la fois fiables et économiques aussi bien au moment de la construction que pendant la vie de l'ouvrage. Les conditions de mise doivent obéir à des règles de pose permettant d'obtenir à la fois une bonne densité et une bonne imbrication.



*Figure 1. Préfabrication des blocs ACCROPODE™ 12 et 16m<sup>3</sup> sur le site de la marine de Sainte-Rose en 2000, (@ ARTELIA).*

La maintenance de ces carapaces monocouches est beaucoup plus limitée que pour les blocs de carapace multicouche. Leurs hautes capacités d'imbrication permettent de ne pas subir de dégradation continue comme la perte de blocs contrairement aux technologies multicouches tels que les blocs cubiques rainurés BCR ou tétrapodes.

## Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance



Figure 2. Construction de la carapace CORE-LOC™ sur le musoir de la digue secondaire du port de pêche au Sultanat d'Oman, @CLI.

C'est dans ce contexte que ARTELIA et ID OCEAN ont mis au point de nouvelles méthodologies de surveillance des digues maritimes à talus. Deux expériences récentes ont permis de mettre au point les équipements et les méthodologies associées pour réaliser des diagnostics de carapaces monocouches fiables.

### 2. Port de pêche au Sultanat d'Oman

#### 2.1 Contexte du projet

Le port de pêche est situé au centre du Sultanat d'Oman et a été construit entre 2015 et 2020 (figure 2). Il s'agit du plus grand port de pêche du Sultanat avec une superficie de 600 hectares et une profondeur maximale de 10 m. Le port est protégé par deux grandes digues construites avec des blocs de carapace artificielle CORE-LOC™ de taille variant de 1 m<sup>3</sup> jusqu'à 6 m<sup>3</sup> (figure 3)

La digue principale d'une longueur totale de 2 km est posée sur un fond sableux allant de 0 à 10 m de profondeur, tandis que la digue secondaire d'une longueur totale de 1 km atteint une profondeur maximale de 8.5 m.



*Figure 3. Face extérieure protégée par des blocs CORE-LOC™ des digues du port de pêche, (@CLI).*

Le suivi d'exécution de la carapace est normalement réalisé tout au long du projet par le maître d'œuvre et l'entreprise, mais dans ce cas précis ce n'est qu'à l'achèvement des travaux de construction que cette dernière a souhaité réaliser une inspection détaillée des ouvrages et obtenir un état factuel de la pose des blocs CORE-LOC™.

## 2.2 Acquisition de données sur zone

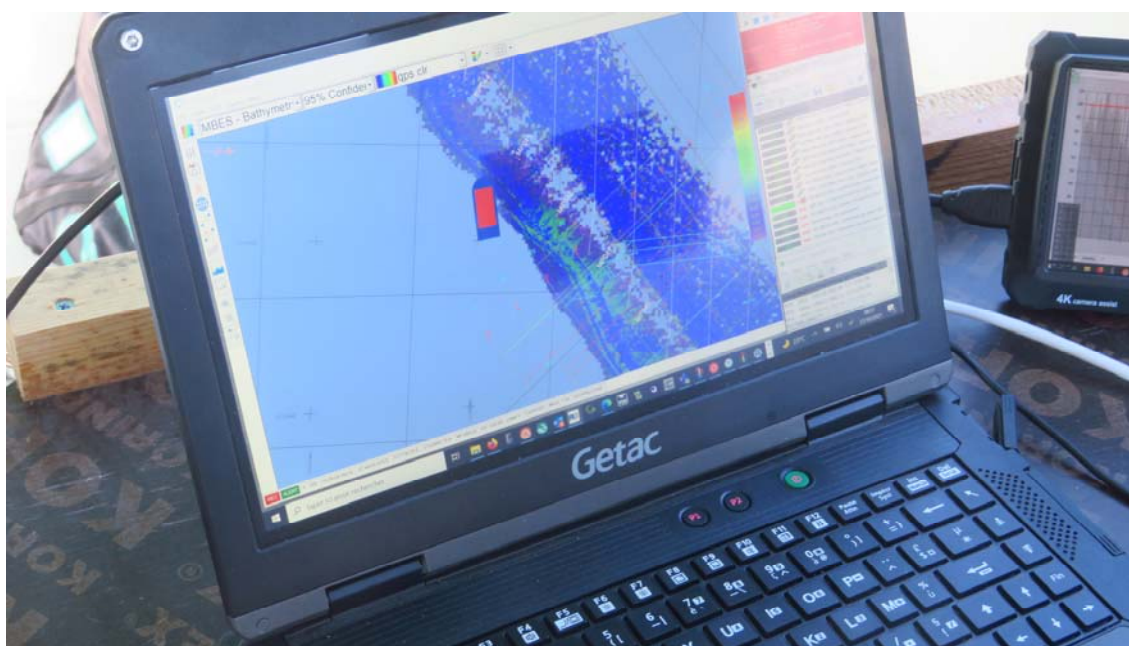
Afin de réaliser le jumeau numérique de la carapace, il est nécessaire d'obtenir un nuage de points haute densité acquis sur site. Les acquisitions de données sous-marines ont été réalisées en utilisant un sonar multifaisceaux haute résolution. ID OCEAN a adapté son équipement afin d'être transportable et exportable facilement à Oman. Le matériel a alors été installé sur une embarcation légère locale, puis calibré (figure 4).

Pour scanner les carapaces en CORE-LOC™ hors d'eau, un prestataire local a été mandaté par l'entreprise de construction pour réaliser un relevé photogrammétrique au moyen d'un drone.

Une des difficultés majeures de ce projet réside dans la petite taille des blocs, les plus petits étant de  $1\text{m}^3$  soit 2.4 tonnes, ce qui fait que le nuage de points doit être suffisamment dense pour que l'algorithme puisse reconnaître les éléments de la carapace. Ce point peut être particulièrement critique au niveau du fil d'eau car la qualité du nuage bathymétrique est dégradée proche de l'interface eau/air à cause des bulles générées par l'agitation de surface et des réflexions acoustiques.

## *Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance*

De plus, le bloc CORE-LOC™ est plus difficile à modéliser que d'autres blocs préfabriqués car il peut résider une incertitude en orientation du bloc si celui-ci a son tronçon posé de manière alignée à la digue et si le nuage de points ne permet pas ensuite de fixer la position des oreilles par manque de données. La qualité du levé est donc primordiale.



*Figure 4. Port de pêche à Oman, digue principale avancement en temps réel de la bathymétrie © ID OCEAN.*

Trois jours complets ont été nécessaires pour scanner les 4 km de carapaces sous-marines, en comptant la calibration du multifaisceaux et la photogrammétrie aérienne. Afin d'assurer la fiabilité des données, plusieurs scans bathymétriques ont été nécessaires. Cette procédure était importante afin d'être certain d'obtenir des jeux de données exploitables après avoir effectué la mission sur site. En effet le travail de nettoyage des données ne pouvait pas être réalisé sur place compte tenu des conditions et il était donc impossible de vérifier sur site que les données étaient compatibles avec les spécifications de l'algorithme de reconnaissance de forme. En cas d'échec il aurait fallu revenir sur place pour refaire les mêmes scans. C'est un paramètre qui a aujourd'hui évolué car les données peuvent être vérifiées sur site grâce à des traitements automatisés plus performants développés par ID OCEAN.

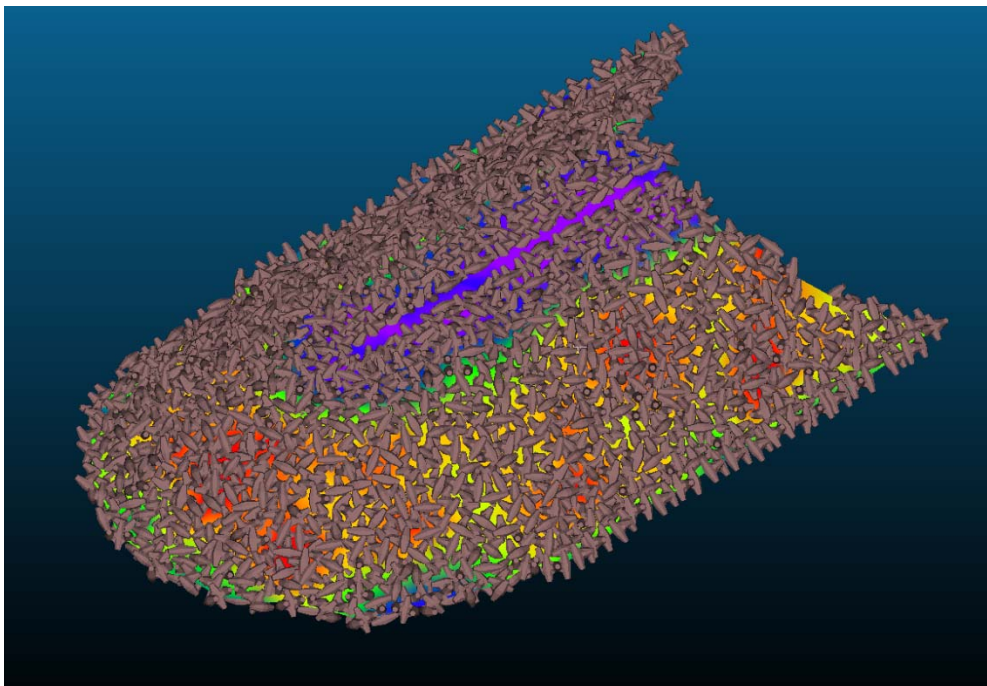
La marée était un facteur important à prendre en compte pendant l'acquisition de données. Le régime de marée sur le site du port de pêche à Oman est un régime semi-diurne, avec un marnage d'approximativement 1.4 m.

Au moment de l'acquisition, la marée haute se produisait en fin d'après-midi, ce qui permettait d'avoir une longue fenêtre d'action pour scanner la carapace CORE-LOC™ tout au long de la journée. Les levés bathymétriques ont été réalisés en privilégiant ces

heures de marée haute, pour pouvoir couvrir le maximum de surface de carapace possible au-dessous de l'eau. Par ailleurs la société en charge de réaliser la photogrammétrie aérienne, devait privilégier les heures de marée basse pour avoir un recouvrement maximal des données, entre la photogrammétrie aérienne et le scanner multifaisceaux.

### 2.3 Création d'un jumeau numérique de la digue

De retour de mission, ID OCEAN a ensuite généré un modèle 3D de la carapace par l'application du procédé numérique breveté SEABIM® qui permet de retrouver automatiquement dans un nuage de points la position et l'orientation de chaque bloc de forme 3D et de taille connues (figure 5). Il aura fallu environ 4 semaines pour réaliser le modèle 3D contenant 32 000 blocs. La phase la plus longue du traitement de données étant le contrôle qualité du modèle 3D généré par l'algorithme et les reprises semi manuelles nécessaires pour corriger les erreurs. L'algorithme de détection automatisé a depuis été grandement amélioré et le temps de traitement pour un projet similaire serait réduit à deux semaines.



*Figure 5. Jumeau numérique 3D du musoir de la digue principale du port de pêche avec un dégradé de couleur montrant les variations de densité de pose, (@ ARTELIA/ID OCEAN).*

L'analyse de la qualité de pose de la carapace a ensuite pu être réalisée sur la base du modèle 3D par les ingénieurs de CLI/ ARTELIA. Par ailleurs, l'outil d'estimation de densité de pose permet de mettre en évidence les zones de tassement potentiel de la carapace.

## Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

Le jumeau numérique géoréférencé ainsi créé constitue l'état zéro pour les inspections futures de la carapace. Celles-ci seront grandement facilitées car la base de données créée permet maintenant de suivre l'évolution des carapaces en comparant les états entre deux inspections. Les inspections futures pourront alors être calées dans le temps, par exemple sur des bases régulières ou après chaque événement météorologique important, comme des cyclones ayant généré des houles significatives sur l'ouvrage. De plus, la position initiale 3D des blocs étant maintenant connue, le temps et le coût de modélisation 3D futurs seront réduits.

### 3. Port de Sainte-Rose, Réunion

#### 3.1 Contexte du projet

La digue de la « Marine de Sainte Rose » construite entre 2000 et 2001 (figure 1) a une longueur de 230m (figure 6), le pied de la carapace est enchâssé dans une souille découpée dans le fond basaltique entre -2m et -7m. Cet ouvrage est situé sur la zone la plus exposée aux cyclones dans la partie Est de l'Ile de la Réunion. La digue est protégée par des blocs ACCROPODE™ de 12m<sup>3</sup> dans la zone où la houle est la moins agressive et des blocs de 16m<sup>3</sup> à l'enracinement et au musoir qui sont les zones les plus critiques.

Les ouvrages maritimes de ce type doivent faire l'objet d'inspections régulières (AUBEL & BESCOND, 2002 ; CEREMA, 2014) et particulièrement après des événements de houle importants comme les cyclones. En 2021 la commune de Sainte Rose a souhaité obtenir un état factuel de la carapace de la digue 20 ans après son achèvement. C'est dans ce contexte que l'inspection et le diagnostic de cet ouvrage ont été réalisés par ARTELIA et ID OCEAN.

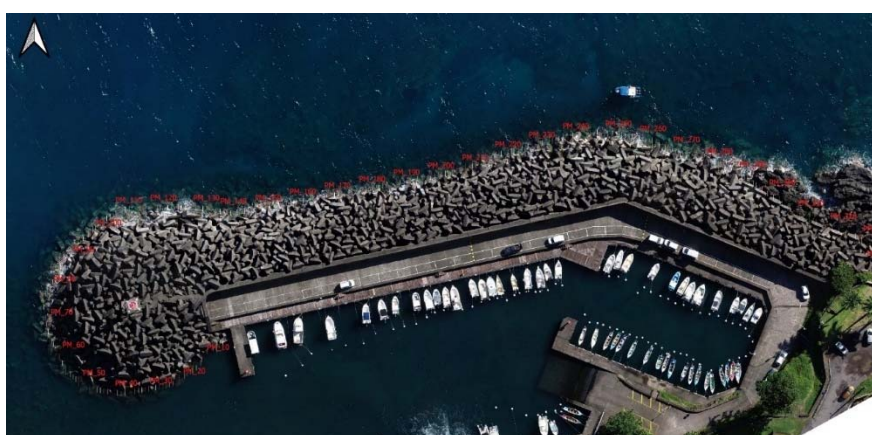
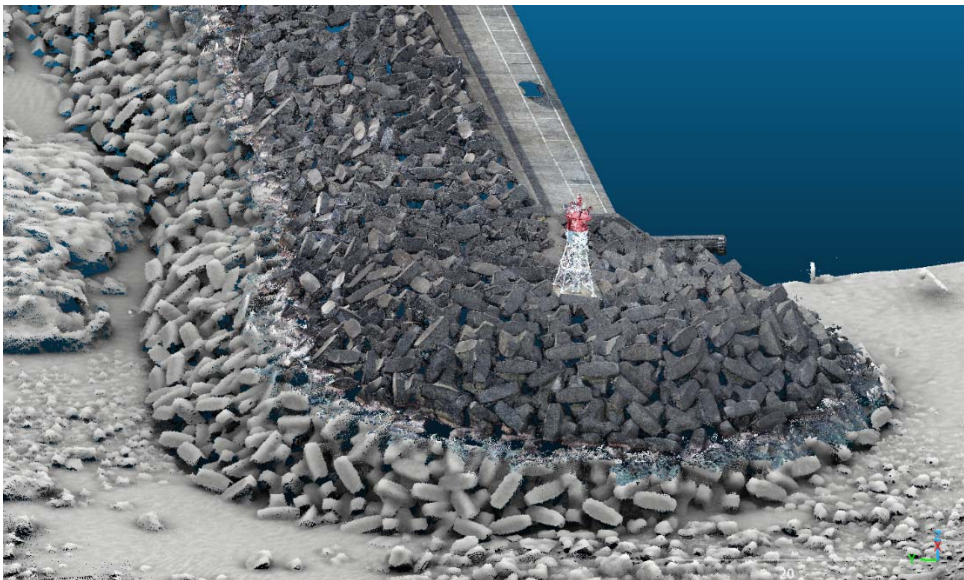


Figure 6. Vue aérienne de la digue et de la « Marine » de Sainte Rose en 2021, (@ ID OCEAN).



### 3.2 Acquisition de données sur zone

L'acquisition de données sous-marines a été réalisée par le même système bathymétrique d'ID OCEAN que celui utilisé à Oman. La photogrammétrie a été réalisée par une société locale spécialisée en levé drone. Les nuages de points créés hors d'eau et sous-marins ont ainsi été assemblés pour ne former qu'un seul nuage de points géoréférencé de haute précision (figure 7). Si certains détails ne sont pas visibles directement sur les modèles 3D, comme la sédimentation en pied de digue ou même l'érosion du fond l'extrême précision des nuages de points permet d'apporter des compléments d'information essentiels et ces nuages de points sont donc aussi exploités directement par les experts pour affiner les diagnostics.



*Figure 7. Fusion des nuages de points bathymétriques et photogrammétriques, la carapace est prête pour la détection automatique des blocs, (@ ID OCEAN).*

### 3.3 Création d'un jumeau numérique de la digue

Pour la digue de Sainte Rose, la reconnaissance de forme a été relativement facile dans la mesure où les blocs de carapace de type ACCROPODE™ I sont gros et les conditions de réalisation des relevés drone et sonar multifaisceaux étaient optimales.

De fait, le nuage de points produit a permis de reconnaître automatiquement plus de 850 blocs. Seuls quelques blocs ont dû être recalés semi-manuellement (un algorithme de reconnaissance de forme local est appliqué après un positionnement approximatif du bloc proche de sa position estimée) car ils étaient fortement enchâssés entre les autres et peu de surfaces étaient visibles. La difficulté majeure du projet résidait dans l'absence de marnage (moins de 50cm) pour obtenir les blocs en zone d'interface air/eau. Néanmoins tous les blocs de la carapace ont été identifiés avec précision grâce aux méthodes de levés appliquées.

## Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

En 2021, la reconnaissance automatique des blocs par l’algorithme aura duré quelques heures pour la carapace de Sainte Rose. Aujourd’hui celle-ci serait encore plus brève.

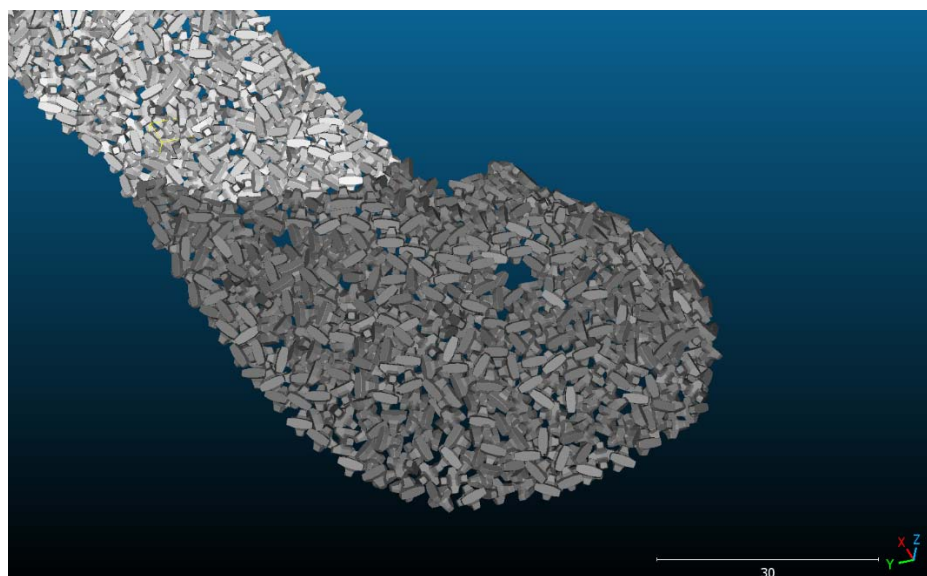


Figure 8. Modèle 3D de la carapace du musoir de la digue de Sainte Rose, (@ ID OCEAN).

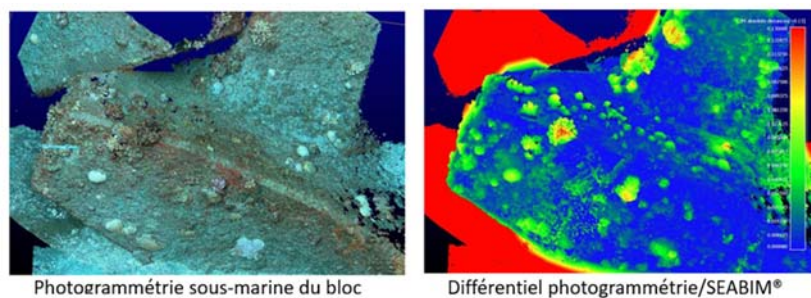
L’obtention du jumeau numérique (figure 8) de la carapace permet ensuite d’appliquer des filtres de contrôle automatisés à l’ouvrage selon les règles définies par le concepteur des blocs (hors-profil (figure 9), densité de pose, contacts, aérations, placement en colonne, orientation).



Figure 9. Exemple de bloc détecté automatiquement comme hors profil, (@ ID OCEAN).

Les carapaces en béton sont généralement des supports favorables au développement d’écosystèmes marins. C’est particulièrement le cas de la carapace de la digue de Sainte Rose. En effet après 20 ans passés dans l’eau, les blocs sont fortement colonisés par les coraux dans la zone située entre -1m et -5m en partie extérieure de l’ouvrage. On note une forte variation de cette colonisation en fonction de la localisation. Au niveau du musoir et en partie interne de l’ouvrage l’importante arrivée d’eau douce en provenance de la centrale électrique modifie le milieu. Ainsi la salinité varie fortement, ne permettant

pas un développement corallien optimal sur ces zones. En partie externe la couche corallienne atteint plusieurs centimètres d'épaisseur et certaines colonies dépassent même les 40cm. C'est un véritable récif artificiel avec des écosystèmes complets qui occupent actuellement cet espace artificiel. Enfin et malgré cette importante couche corallienne sur les blocs cela n'a pas posé de problème pour la reconnaissance automatique des blocs par l'algorithme. La modélisation 3D permet même de faire une estimation quantitative surfacique de la colonisation corallienne en réalisant un différentiel entre le nuage de points acquis et le modèle reconstruit (figure 10). La même méthodologie est appliquée afin d'identifier des blocs cassés sur l'ouvrage.



*Figure 10. Estimation quantitative du développement corallien sur un bloc faiblement colonisé par comparaison entre une photogrammétrie sous-marine du bloc et sa forme originale réelle trouvée par l'algorithme, (@ ID OCEAN).*

#### **4. Conclusion**

SEABIM® est un outil innovant et versatile de numérisation du suivi de digue monocouche en blocs béton préfabriqués qui permet une analyse objective et simplifiée de l'état d'un ouvrage dans le temps par tous les acteurs impliqués (maitre d'ouvrage, maitre d'œuvre, entreprise, assurances, experts judiciaires).

Cette solution d'inspection exhaustive permet d'identifier en quelques instants les zones critiques de l'ouvrage, de repérer les blocs cassés et de comparer des données factuelles entre deux états. Tout mouvement de bloc ou anomalie pourra alors être identifiée en quelques secondes là où il fallait plusieurs jours d'interventions auparavant. Contrairement aux inspections visuelles par plongeurs, elle ne nécessite pas que la visibilité soit bonne.

Les futures inspections similaires qui auront lieu sur ces ouvrages permettront de la même manière de se référer aux états précédents. Il en résulte un meilleur suivi et une économie substantielle car les inspections sont réalisées en quelques heures pour les petits ouvrages jusqu'à quelques jours pour de très grandes structures.

Une fois les conclusions sur l'état de la carapace remises au maître d'ouvrage, celui-ci peut gérer le plan d'entretien de son ouvrage en toute connaissance de cause. Les maîtres d'ouvrage pourront faire réaliser les inspections sur des bases régulières ou après des événements significatifs.

## *Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance*

L'outil s'intègre ainsi logiquement dans les démarches de BIM (Building Information Modeling), de DOE (Dossier des Ouvrages Exécutés) numériques et de gestion patrimoniale qui s'imposent progressivement aux projets maritimes.

### **5. Références**

AUBEL P., BESCOND B. (2002). *Surveillance, auscultation et entretien des ouvrages maritimes, Fascicule 4 : Digue à talus et digues mixtes*, Editeur CEREMA (ex. CETMEF), 95p. ISSN 2417-9701

CEREMA (2014). *Guide Enrochement - L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques*, Traduction française du Rock Manual, 2<sup>de</sup> édition Manual for the use of rock in hydraulic engineering or Rock Manual, 1302p. ISSN 2417-9701