



Renforcement et conception d'ouvrages côtiers avec un matériau responsable : le Geocorail

Guillaume DUPONT¹, Alaric ZANIBELLATO¹, Nicolas VERJAT¹

1. Seacure, 4 rue Gaston Castel, 13016 Marseille, France

guillaume.dupont@seacure.fr

Résumé :

Depuis une dizaine d'années, un nombre croissant de recherches sur de nouvelles méthodes de conception des ouvrages ont été menées en génie côtier. Ceci est motivé par les observations climatiques, environnementales et socio-économiques actuelles :

L'augmentation de la fréquence des événements extrêmes, la forte anthropisation des zones côtières, la vulnérabilité des écosystèmes côtiers, les ressources,...

Dans cette perspective, l'entreprise Seacure (anc. Geocorail), basée dans le sud de la France, développe un procédé électrochimique pour produire un matériau apte à la conception et au renforcement d'ouvrages côtiers. Ce matériau est formé en utilisant le calcium et le magnésium présents dans l'eau de mer pour produire une roche similaire à du grès de plage ou du béton.

Parmi les nombreuses réalisations effectuées, nous présentons dans cet article une application concernant la conception d'une butée de pied en gabion et Geocorail pour la stabilisation du musoir d'un épi. Nous présentons aussi succinctement deux projets en lien avec la restauration écologique, à travers la fabrication de modules pour récifs artificiels.

Mots-clés :

Génie côtier, Solution basée sur la nature, Sédiments, Dépôt calcomagnésien, Geocorail, Protection cathodique, Travaux maritimes, Récifs artificiels.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

1. Introduction

Le procédé Geocorail découle d'observations réalisées dans le domaine de la protection cathodique (PC) qui est une technique utilisée afin de prévenir les phénomènes de corrosion pouvant se produire lorsque des structures métalliques sont placées dans des électrolytes (eau de mer, terre, béton, ...) (ASHWORTH & BOOKER, 1986). Une conséquence de la PC en eau de mer est la formation de dépôt calcomagnésien sur les éléments métalliques. En effet, les réactions électrochimiques ayant lieu à la surface du métal, lorsque celui-ci est sous protection, engendrent la précipitation de carbonate de calcium (CaCO_3) sous forme d'aragonite et d'hydroxyde de magnésium (Mg(OH)_2) sous forme de brucite. C'est l'association de ces deux composés qui constitue le dépôt calcomagnésien.

Ce matériau a fait l'objet de nombreuses études (CARRÉ *et al.*, 2020), autant sur le procédé de formation (YAN *et al.*, 1993) que sur ses propriétés (JOHRA *et al.*, 2021), et sur ces applications en PC (ROUSSEAU *et al.*, 2010) et pour la restauration écologique (GOREAU & HILBERTZ, 1997).

Lorsque la formation de dépôt calcomagnésien a lieu en présence de sédiments, il se crée un agglomérat rocheux similaire à du grès de plage appelé "Geocorail" (voir figure 1); le dépôt tenant rôle de ciment, liant les granulats (CARRÉ *et al.*, 2020). Ce matériau comporte des similitudes avec le béton, du point de vue de sa structure (constituant chimiques, granulats, porosité), et de ses propriétés.



Figure 1. Prises de vues d'échantillons de Geocorail obtenus dans des sédiments de natures différentes.

Cela en fait un matériau apte à être utilisé dans la conception d'ouvrages côtiers, seul ou en combinaison avec les techniques de réalisations de référence. Il permet à ce titre une éco-conception d'ouvrage originaux, la restauration et consolidation d'ouvrages existant, ainsi que d'augmenter la résilience des nouveaux ouvrages (ZANIBELLATO *et al.*, 2018).

La mise en œuvre du procédé requiert, comme dans le cadre de la PC, l'utilisation d'anodes sacrificielles, idéalement choisies en magnésium, ou des générateurs de courant associés à des anodes inertes en titane et oxydes mixtes métalliques (TiMMO) pour une solution à courant imposé. Tant que le dispositif est alimenté en courant, le matériau continue à se former et se reconstruit s'il subit des agressions extérieures. Dans tous les cas, les courants entrant en jeu sont des courants très basse tension (TBT), sans danger pour la faune, la flore (GOREAU, 2014) et les activités humaines.

2. Renforcement d'une butée de pied de musoir

La mise en œuvre du procédé Geocorail présenté dans cette section intervient dans le cadre du plan "Territoire Zéro Carbone" initié par l'agglomération de La Rochelle. Parmi les initiatives engagées, une partie concerne la ré-habilitation des aménagements côtiers. En 2010, la tempête Xynthia a engendré des inondations importantes sur le littoral charentais et l'agglomération de La Rochelle. Ceci a révélé que les infrastructures de défense contre les submersions marines étaient insuffisantes. Le projet présenté ici concerne le renforcement du musoir de l'épi de Port-Neuf (La Rochelle) (figure 2) par l'installation d'un pied d'ouvrage en gabions sur lesquels est appliqué le procédé Geocorail.

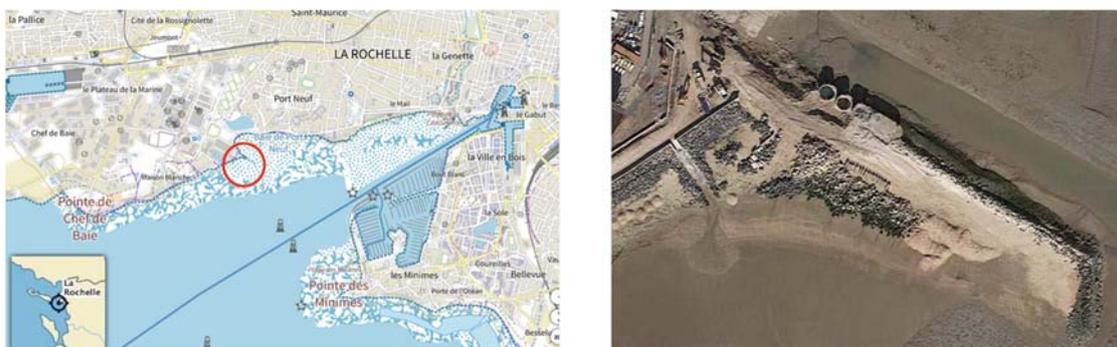


Figure 2. (gauche) Localisation de l'épi de Port-Neuf et de l'agglomération de La Rochelle. (droite) Prise de vue satellite de l'épi de port neuf avant son ré-aménagement début 2021 (source : Google Earth).

Outre l'agglomération de la Rochelle, ce projet a été réalisé en partenariat avec les sociétés Maccaferri, Eiffage, le CEREMA, l'Université de La Rochelle et SCE CREOCEAN. La mise en œuvre du procédé Geocorail sur cet ouvrage fait l'objet d'une étude carbone, ainsi que d'un suivi de l'évolution du matériau et de la stabilité de l'ouvrage.

L'ouvrage consiste en un talus en enrochement face à la mer permettant de dissiper par déferlement la plus grosse partie de l'énergie de la houle. Afin de renforcer l'ouvrage et améliorer sa stabilité, une butée de pied en gabions a été installée sur le tour du musoir (figure 3).

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

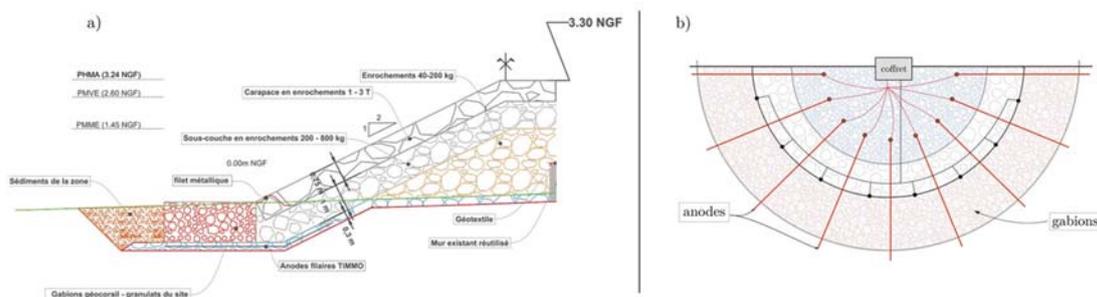


Figure 3. a) Vue en coupe transverse du talus. (b) vue de dessus du musoir.

Cela représente la mise en place de 40 mètres linéaires de gabions de 2 m³, soit 80 m³ de gabions en lieu et place de 80 m³ d'enrochement. Les gabions sont en acier et attachés les uns aux autres de manière à former un bloc unique. Ils sont remplis sur site, en utilisant les granulats présents, et organisés en partie à la main afin de garantir un remplissage optimal (figure 4).

L'étude géotechnique de l'ouvrage a été effectuée par le Cerema. Celle-ci intègre la stabilité au poinçonnement et la stabilité rotationnelle du musoir, les tassements, ainsi que la stabilité des gabions. Ceci a été réalisé en fonction des caractéristiques géotechniques et hydrodynamiques du site. Il en résulte que l'ouvrage répond à tous les critères de stabilité en vigueur, sans application du procédé Geocorail. La combinaison gabions-Geocorail a pour but de créer un bloc monolithique stable liaisonné à la carapace, tout en assurant la protection des éléments métalliques et en limitant les mouvements des roches dans les gabions. La formation de Geocorail ne doit cependant pas obstruer les mailles des gabions de plus de 60 % (en adéquation avec la porosité volumique des gabions) afin de garantir un écoulement suffisant dans la structure.

La polarisation de l'installation est effectuée par courant imposé. Pour cela, des anodes ont été disposées sous les gabions dans les couches inférieures de l'ouvrage et les sources de courant ont été placées dans des caissons étanches dans des regards intégrés au talus (figure 3).

La mise en service a été effectuée au mois de mars 2021. La mise en courant de l'ouvrage ainsi que le suivi du matériau est prévu sur une période de 5 ans. Le suivi de la stabilité de l'ouvrage est prévu sur 8 ans.



Figure 4. Photographie de l'installation de la butée de pied et du remplissage des gabions.

En plus du suivi qualitatif du matériau réalisé sur l'ouvrage, des échantillons témoins ont été placés à proximité et dans les mêmes conditions de polarisation. Ces échantillons seront prélevés et analysés tous les ans pendant cinq ans. Ce suivi est assuré par l'Université de La Rochelle. A ce jour, les résultats du premier prélèvement ne sont pas encore connus. Il a néanmoins été réalisé une analyse des sédiments du site, qui consiste en une analyse de la granulométrie, des masses volumiques, de la porosité, une analyse chimique, et une analyse minéralogique. Ceci a montré que le site est très favorable à la formation de Geocorail, et les premières observations sur site, réalisées 8 mois plus tard, ont confirmé cela (figure 5). Le Geocorail apparaît présent sur toutes les surfaces métalliques avec des épaisseurs comprises entre 5mm et 20mm. Cet écart des valeurs peut être dû aux effets de marée, faisant varier le temps d'immersion de chaque zone et par conséquent l'oxygène disponible. Le matériau paraît résistant, solidaire des éléments rocheux, et conforme aux attentes.



Figure 5. Photographies des gabions après 8 mois de polarisation.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

Dans le même temps, un suivi des évolutions potentielles de l'ouvrage a été initié. Il s'agit d'un suivi par photogrammétrie par drone, réalisé par le Cerema. Cela consiste en un sembler de prise de vue de l'ouvrage afin de d'établir un Modèle Numérique d'Élévation et des ortho-images. L'état initial de l'ouvrage a été réalisé en Novembre 2021 (figure 6) et sera confronté aux relevés ultérieurs prévus dans 1,2,4,6 et 8 ans.

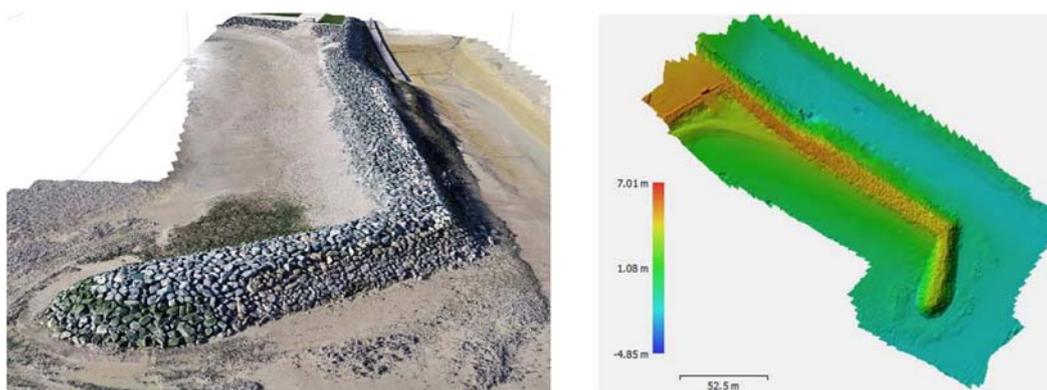


Figure 6. (gauche) Modèle Numérique d'Élévation de l'état initial de l'épi de Port-Neuf. (droite) Modèle 3D de l'épi.

Dans le cadre de ce projet, la solution Geocorail a été choisie dans le but de réduire l'utilisation des enrochements tout en proposant une butée de pied solidaire de plusieurs dizaines de tonnes, assurant ainsi une très bonne stabilité du pied de digue. L'exploitation de carrière peut avoir un coût carbone significatif en fonction des tailles d'enrochement et des distances d'approvisionnements. Afin de mesurer l'empreinte carbone de la solution Geocorail mise en œuvre ici, la Coopérative Carbone a paramétré l'outil QUANTI-GES développé par l'ADEME.

Dans le cas présent, seule la comparaison avec une solution en enrochement a été effectuée, l'hypothèse principale étant que l'on remplace les enrochements par des granulats du site, à quantité égale. Après prise en compte de tous les facteurs du projet, matériaux, logistique, gestion, énergie... il apparaît que la réduction des émissions de carbone est de l'ordre de la centaine de kilogrammes par an. Ce qui peut représenter une réduction substantielle sur la durée de vie de l'ouvrage. Ceci pouvant être encore amélioré par l'utilisation de matériaux de recyclage (bétons concassés, matériaux recyclés du BTP, coquilles d'huitres...).

3. Restauration écologique, économie bleue et économie circulaire

Récemment, des projets en lien avec des problématiques environnementales ont été initiés. Ces projets portent sur la restauration des écosystèmes et la protection des ressources halieutiques. Parmi ceux-ci, nous présentons dans la suite deux réalisations qui concernent la préfabrication de modules destinés à la complexification de récifs. Pour chacun des cas, le mode opératoire est sensiblement le même. Il consiste en une phase de

conception des modules (forme, fonction, ...), une phase de formation du matériau (immersion, polarisation), une phase de séchage afin d'éviter les délocalisations et exportations d'espèces (rinçage, séchage complet), puis installation définitive sur site.

Le premier projet est réalisé en partenariat avec le Syndicat Mixte du Bassin de Thau, Sète Agglopôle et COVED Environnement. Il intervient dans le cadre du développement de nouveaux circuits de valorisation des déchets conchylicoles composés d'un mélange de coquilles d'huîtres et moules, de sédiments et d'algues et végétaux. En effet, l'activité autour du bassin de Thau génère environ dix mille tonnes de déchets par an avec seulement quelques pourcents revalorisés.

Nous avons alors mis en œuvre un site pilote au port du Mourre Blanc (Mèze) afin de réaliser des structures en Geocorail en utilisant les déchets à valoriser. Ceci afin de produire des modules écologiques pour la complexification de récifs et la restauration écologique (nurseries...). Les structures métalliques sont constituées d'un treillis en acier rigide assemblé en forme de brique à l'intérieur duquel est placé des formes complexes en grillage fin (figure 7). Ces structures sont placées dans des big-bags, puis recouvertes de déchets. Les sacs sont ensuite immergés dans l'eau de mer. Les structures sont polarisées depuis mai 2021. Le premier module a été sorti en janvier 2022. On peut voir sur celui-ci (figure 7) que tous les éléments métalliques sont recouverts d'un dépôt. De nombreuses coquilles sont solidaires du matériau, principalement en partie centrale constituée de grillage fin. Comme attendu, le module offre une structure minérale complexe, tout à fait adaptée à la complexification de récifs.



Figure 7. (gauche) Module métallique avant polarisation. (droite) Module après 1 an de polarisation avec des déchets conchylicoles.

Le second projet est réalisé pour le compte de la Direction du Milieu Marin de la Ville d'Agde qui gère l'Aire Marine Protégée de la côte agathoise (site Natura 2000 de 6152 ha, réserve marine de 310 ha). Les fonds marins y sont composés d'une multitude

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

d'habitats, dont le coralligène et la posidonie. Aujourd'hui, afin de soutenir durablement les activités de pêche, la Ville d'Agde en collaboration avec des acteurs locaux a décidé de complexifier les récifs existants (premiers récifs artificiels immergés en 1985) via l'intégration de 50 nouveaux modules fabriqués en Geocorail.

Les modules ont été installés sur le site de préfabrication en Février 2022. Après 3 mois de polarisation, un dépôt calcomagnésien est présent sur l'ensemble des éléments métalliques (figure 8). L'installation des modules sur le récif existant est prévue en Janvier 2023.



Figure 8. Exemple de module de forme cubique avant polarisation (gauche) et en cours de polarisation après 6 mois (droite).

4. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté une réalisation en lien avec le renforcement d'ouvrage côtier intégrant le procédé Geocorail. Les premières observations, un an après la mise en service, ont montré un bon développement du matériau et une bonne intégration à la structure de l'épi. Ceci conjointement à un impact carbone faible. A ce jour la mise en œuvre de cette solution est entièrement satisfaisante. Les prochains résultats concernant le matériau, la stabilité de l'ouvrage sont attendus prochainement et permettront d'étoffer le retour d'expérience sur la pertinence de la solution.

Les cas concernant l'éco-conception de modules pour récifs artificiels mettent en avant le fait qu'il est possible de proposer des structures complexes, légères et avec un substrat propice au développement biologique, à partir d'éléments métalliques. Ceci offre de grandes opportunités quant aux applications, vis à vis des espèces ciblées et des lieux d'implantations.

5. Références bibliographiques

ASHWORTH V., BOOKER C. J. (1986). *Cathodic protection: Theory and practice*. Ellis Horwood Ltd., Chichester, England, 1986. 357p. ISBN 0-85312-512-0

- CARRÉ C., ZANIBELLATO A., ACHGARE N., MAHIEUX P. Y., TURCRY P., JEANNIN M., SABOT R. (2020). *Electrochemical limestone synthesis in seawater binds metal grids and sediments for coastal protection*. Environmental Chemistry Letters, 18(5), 1685-1692. DOI:10.1007/s10311-020-01019-4
- CARRÉ C., ZANIBELLATO A., JEANNIN M., SABOT R., GUNKEL-GRILLON P., SERRES A. (2020). *Electrochemical calcareous deposition in seawater. A review*. Environmental Chemistry Letters, 18(4), 1193-1208. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01002-z>
- GOREAU T. J., HILBERTZ W. (1997). *Mineral accretion technology for coral reef restoration, shore protection, and adaptation to rising sea level*, 8th Global warming international conference and exposition, No. CONF-970522, Global Warming International Center, Woodridge, IL, USA.
- JOHRA H., MARGHERITINI L., ANTONOV Y. I., FRANDBSEN K. M., SIMONSEN M. E., MØLDRUP P., JENSEN R. L. (2021). *Thermal, moisture and mechanical properties of Seacrete: A sustainable sea-grown building material*. Construction and Building Materials, 266, 121025. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121025
- ROUSSEAU C., BARAUD F., LELEYTER L., JEANNIN M., GIL O. (2010). *Calcareous deposit formed under cathodic protection in the presence of natural marine sediments: A 12-month experiment*. Corrosion science, 52(6), 2206-2218. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.02.047>
- YAN J. F., WHITE R. E., GRIFFIN R. B. (1993). *Parametric studies of the formation of calcareous deposits on cathodically protected steel in seawater*. Journal of the Electrochemical Society, 140(5), 1275. <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2220970/pdf>
- ZANIBELLATO A., VERJAT N., ANDREANI P., SOLESIO J. (2018). *Le Geocorail: un matériau innovant pour la lutte contre l'érosion et le renforcement d'ouvrage maritime*. XV^{ème} Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil. La Rochelle, pp.505-512, doi:10.5150/jngcgc.2018.059
- GOREAU T. (2014). *Electrical stimulation greatly increases settlement, growth, survival, and stress resistance of marine organisms*. Natural Resources, 5, 527-537. doi: 10.4236/nr.2014.510048

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance