

guillaume.dupont@seacure.fr

Concevoir des ouvrages côtiers avec un matériau éco-responsable, le géocorail.

DUPONT Guillaume¹, ZANIBELLATO Alaric² & VERJAT Nicolas³

¹Seacure, 4 rue Gaston Castel, 13012, Marseille, France

RESUME : *Depuis plusieurs années maintenant, la société Seacure (anc. Géocorail) développe un procédé électrochimique en eau saumâtre permettant la formation d'un matériau, le géocorail. Ce matériau consiste en un substrat métallique sur lequel est déposé un mélange de sédiments et de structures calcomagnésiennes. Divers programmes de recherches ont été menés et/ou sont toujours en cours et portent sur la compréhension des mécanismes de formation du matériau, sa durabilité, ses propriétés physico-chimiques, ... Dans le cadre de ces projets, des chantiers pilotes ont été effectués et nous proposons de présenter une de ces réalisations en lien avec le renforcement d'ouvrages côtiers. Le cas présenté concerne la réalisation d'une structure de stabilisation de pied de digue en gabions à empreinte carbone réduite.*

MOTS CLEFS : *dépôt calcomagnésien, protection cathodique, électrochimie, génie côtier, solution basée sur la nature.*

ABSTRACT : *For several years now, the company Seacure (formerly Geocorail) has been developing an electrochemical process in brackish water allowing the formation of a material, the geocorail. This material consists of a metallic substrate on which a mixture of sediments and calcomagnesian structures is deposited. Various research programs have been conducted and / or are still underway and focus on understanding the mechanisms of formation of the material, its durability, its physicochemical properties, ... Within the framework of these projects, pilot worksites have been carried out and we propose to present one of these achievements in connection with the reinforcement of coastal structures. The case presented concerns the realization of a structure of stabilization of foot of dyke in gabions with reduced carbon footprint.*

KEYWORDS: *calcareous deposit, cathodic protection, electrochemistry, coastal engineering, nature based solution.*

1. Introduction

Lorsqu'une structure en acier est immergée en milieu marin, elle subit une altération par réaction chimique, la corrosion (Bard et Faulkner 1983). Les principales réactions électrochimiques ayant lieu durant ce processus sont l'oxydation du fer (1) et la réduction de l'oxygène (2):



Une méthode efficace afin de se prémunir de la corrosion est la protection cathodique (PC) (Ashworth et Booker 1986). Cette technique consiste à arrêter l'oxydation du fer en fournissant des électrons à la structure à protéger par le moyen d'anodes sacrificielles (PCGA : protection cathodique par couplage galvanique) ou de sources de courants externes (PCCI : protection cathodique par courant imposé). Une conséquence de la PC est la formation de dépôt calcomagnésien sur les surfaces métalliques.

Le dépôt calcomagnésien se forme conjointement à la réactions cathodiques (2) en utilisant les ions calcium et magnésium présents naturellement dans l'eau de mer. En effet, la réaction cathodique engendre une augmentation locale du pH la précipitation de carbonate de calcium et d'hydroxyde de magnésium qui sont les constituant du dépôt calcomagnésien. Ces deux composés, le carbonate de calcium (CaCO_3) et l'hydroxyde de magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), sont des minéraux que l'on retrouve naturellement sous diverses formes. Dans les roches calcaires et les coquilles d'animaux marins pour le premier, et dans les roches carbonatées pour le second. Diverses études ont été réalisées sur le dépôt calcomagnésien (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 et Hilbertz 1997). Ces études ont montré que le dépôt calcomagnésien peut avoir des résistances à compression comprises entre 5 MPa et 20 MPa (Johra et al. 2021).



Figure 1: Prises de vues d'échantillons de geocorail obtenues dans des sédiments de natures différentes.

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" (Figure 1); le dépôt tenant rôle de ciment, liant les granulats (Carré et al. 2020). Ce matériaux comporte des similitudes avec le béton, du point de vue de sa structure (constituant chimiques, granulats, porosité), et de ses propriétés. Selon la nature des sédiments, on peut noter une résistance à la compression de l'ordre de 10MPa (Carré et al. 2020).

Ce matériau peut être utilisé dans la conception d'ouvrages côtiers, seul ou en combinaison avec les techniques de réalisations de références. Il permet à ce titre une eco-conception d'ouvrage originaux, la restauration et consolidation d'ouvrages existant, ainsi que d'augmenter la résilience des nouveaux ouvrages.

La mise en œuvre du procédé requiert pour une solution autonome 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 matériaux continue à se former et se reconstruit si il subit des agressions extérieures. Dans tout les cas, les courants entrant en jeu sont des courants basse tension, sans danger pour la faune, la flore et les activités humaines.

2. Renforcement du musoir d'un épi : gabions et procédé géocorail

Cette mise en oeuvre du procédé géocorail intervient dans le cadre du plan "Territoire Zero 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 développé dans la suite concerne le renforcement du musoir de l'épi de Port-Neuf (Figure 2) par l'installation d'un pied d'ouvrage en gabions sur lequel est appliqué le procédé geocorail. 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 oeuvre du procédé geocorail sur cet ouvrage fait l'objet d'une étude carbone, ainsi que d'un suivi de l'évolution du matériaux et de la stabilité de l'ouvrage.



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-amenagement début 2021 (source : Google Earth)

L'ouvrage consiste en un talus en enrochements 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. 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 brut 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 3).



Figure 3: (gauche) Prise de vue de du des gabions en phase de remplissage. (droite) Prise de vue de l'installation finale, et de son intégration à l'ouvrage.

La polarisation de l'installation est effectuée par courant imposé. Pour cela, des anodes TiMMO ont été disposés 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.

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

2.1 Evolution du matériaux

En plus du suivi qualitatif du matériaux 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.



Figure 4: (gauche) Prise de vue de la partie supérieure des gabions 8 mois après la mise en service. (droite) Prise de vue du filet rendu solide des enrochements grâce au géocorail.

A ce jour, les résultats du premier prélèvement ne sont pas encore connus. Il a été néanmoins 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 géocorail, et les premières observations sur site, réalisées 8 mois plus tard, ont confirmé cela (Figure 4). Le géocorail 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, solide des éléments rocheux, et conforme aux attentes.

2.2 Étude carbone.

Lors de la réalisation d'ouvrage côtiers, d'importantes quantités d'enrochements et/ou de béton peuvent être utilisées. La solution géocorail a été choisie pour réduire l'utilisation de ces deux ressources. En effet, l'exploitation de carrière peut avoir un coup carbone significatif en fonction des tailles d'enrochement et des distances d'approvisionnement mais surtout, la production de ciment représente 5 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Afin de mesurer l'empreinte carbone de la solution géocorail mise en œuvre ici, la Coopérative Carbone a paramétré l'outil QUANTI-GES développé par l'ADEME. De manière générale, il ressort qu'une solution géocorail a un bilan carbone positif relativement à des solutions enrochements ou béton. Les raisons en sont que :

- on utilise des matériaux prélevés sur place (petits rochers, galets. . .)
- on réduit les distances d'approvisionnement et les transports
- on réduit la taille des moyens de chantiers
- on réduit l'utilisation de combustibles
- la production d'électricité est, selon les cas, tout ou partiellement décarbonée.

Ceci pouvant être encore amélioré par l'utilisation de matériaux de recyclage (béton concassés, matériaux recyclés du BTP, coquilles d'huîtres. . .).

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 tout 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 ans. Ce qui peut représenter une réduction substantielle sur la durée de vie de l'ouvrage.

2.3 Stabilité de l'ouvrage.

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 semble de prise de vue de l'ouvrage afin de d'établir un Modèle Numérique d'Élevation et des ortho-images. L'état initial de l'ouvrage a été réalisé en Novembre 2021, et les résultats sont montrés sur la figure 5. Ils seront confronté aux relevés ultérieurs prévus dans 1,2,4,6 et 8 ans.

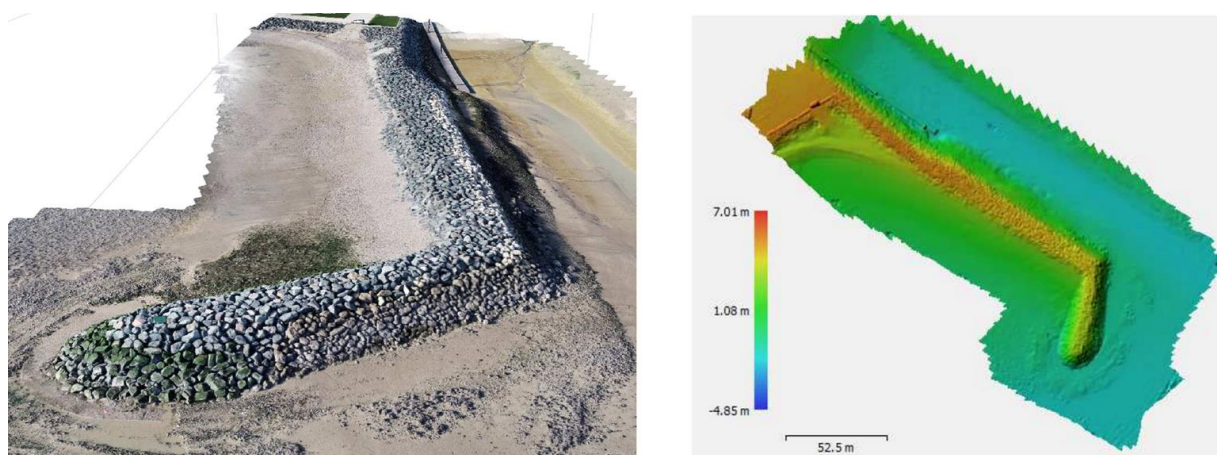


Figure 5: (gauche) Modèle Numérique d'Élevation de l'état initial de l'épi de Port-Neuf. (droite) Modèle 3D de l'épi.

3. Conclusion

Depuis la réalisation jusqu'aux dernières observations, le bilan du projet est positif. L'installation s'est déroulé suivant ce qui avait été prévu, le procédé géocorail est en cours et le matériaux se forme correctement. Huit mois après la mise en service, toutes les surface métalliques sont recouvertes, une adhésion se fait entre le géocorail est les enrochements, dans les gabions et sur le carapace en contact. De plus, l'étude carbone tend à montrer un bénéfice de la solution quand à son empreinte carbone de l'emménagement réalisé.

4. REFERENCES

- Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (1983). Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications. *Surface Technology*, 20(1), 91-92.
- Ashworth, V., & Booker, C. J. (1986). Cathodic protection: Theory and practice.

- 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.
- 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.
- 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.
- Johra, H., Margheritini, L., Antonov, Y. I., Frandsen, 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.
- Goreau, T. J., & Hilbertz, W. (1997). *Mineral accretion technology for coral reef restoration, shore protection, and adaptation to rising sea level* (No. CONF-970522-). Global Warming International Center, Woodridge, IL (United States).
- 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.