

Des bactéries au service de la durabilité des structures en béton armé en environnement marin

Julie Dubuit ^{1, 2, 3}

¹ LMDC, Université de Toulouse, UPS, INSA, 135 avenue de Rangueil, 31077, Toulouse Cedex 4, France

² Laboratoire de Génie Chimique, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France

³ CORROHM, 815 La Pyrénéenne, 31670, Labège, France

RESUME La gestion de la corrosion dans les structures en béton armé (BA) revêt une importance capitale en matière d'impact environnemental, de sécurité des usagers et de coûts financiers. Ce constat est particulièrement vrai pour les structures BA en environnement marin, plus gravement touchées du fait de l'agressivité de l'eau de mer. L'objectif de ce travail de recherche est d'étudier une nouvelle biotechnologie dédiée à l'anticorrosion des structures maritimes en BA : la protection cathodique biogalvanique (PCBG). Il s'agit d'une solution innovante et respectueuse de l'environnement inspirée des piles à combustible microbiennes benthiques. Des micro-organismes électro-actifs, naturellement présents dans les sédiments marins, peuvent former des biofilms à la surface de matériaux conducteurs (électrodes). Le complexe électrode-biofilm forme une bioanode capable de générer des électrons par le biais d'un processus bactérien naturel d'oxydation de matières organiques présentes dans les sédiments. Les bioanodes peuvent alors fournir spontanément un courant de protection cathodique à une structure BA située dans son environnement immédiat. Des essais en laboratoire et in situ ont permis de confirmer la faisabilité de cette nouvelle solution de maintenance bio-électrochimique.

Mots-clefs Béton armé, Corrosion, Protection Cathodique, Environnement marin, Anode microbienne

I. INTRODUCTION

Les objectifs de développement durable de l'ONU (Nations Unies, 2020) visent à répondre au défi environnemental et climatique à relever collectivement et soulignent l'importance de mettre en place des actions à l'échelle industrielle. En effet, l'impact environnemental des différents secteurs industriels (transports, agriculture, industrie manufacturière, construction) est colossal. En particulier, le secteur de la construction représenterait 18% des émissions de gaz à effet en France, correspondant à 78 Mt CO₂ eq (notre-environnement.gouv.fr). Il est donc essentiel d'inscrire l'industrie de la construction, et plus particulièrement du béton armé, dans une logique plus durable, en réduisant ses émissions de CO₂, sa consommation d'énergie et de ressources, ainsi qu'en minimisant la production de déchets.

Le béton est le matériau le plus utilisé par l'Homme après l'eau (Gagg, 2014). La production de ciment à elle seule représente 8,6% des émissions totales anthropogènes de CO₂ (Miller et al., 2016), majoritairement du fait de la calcination du clinker. Afin de s'orienter vers une industrie de la construction bas carbone, différents leviers d'action sont possibles, comme la diminution de

l'utilisation de ressources naturelles, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la réduction de la consommation d'énergie ou encore l'augmentation de la durée de vie des structures. Parmi les différents leviers d'action, les travaux de recherche présentés ci-après portent en particulier sur l'augmentation du cycle de vie des structures existantes. La préservation et la maintenance du patrimoine bâti peut grandement contribuer à réduire l'impact environnemental de l'industrie de la construction. La lutte contre la corrosion des aciers dans les bétons s'inscrit donc dans une logique globale de construction bas carbone. En effet, de nombreuses structures en béton armé (BA) sont aujourd'hui affectées par la corrosion, principale cause de leur vieillissement prématuré (François et al., 2018). La pathologie a un impact significatif en termes d'environnement, de sécurité des utilisateurs et de coûts financiers (Angst, 2018). Les coûts totaux associés à la corrosion des infrastructures représentent environ 4% du PIB des pays industrialisés chaque année (Koch, 2017).

Pour lutter contre la corrosion, des technologies de maintenance électrochimique connaissent un essor très important ces dernières années. C'est le cas de la protection cathodique (PC) et de la prévention cathodique (Pedefferri, 1996), qui permettent de ralentir l'évolution de la pathologie, voire de la stopper. Ces technologies de maintenance électrochimique présentent cependant certains inconvénients présentés ci-après.

Les travaux de recherche présentés dans cet article portent sur le développement d'une technologie plus vertueuse de maintenance préventive des structures BA contre la corrosion en environnement marin : la Protection Cathodique BioGalvanique (PCBG), dont la preuve de concept a été établie dans le cadre d'une étude précédente (Dubuit et al., 2023). La PCBG est dérivée de la technologie des piles à combustible microbiennes benthiques (PCMB) - le terme benthique référant à ce qui vit au fond des eaux - qui constituent une source d'énergie électrique renouvelable (Zabihallahpoor et al., 2015).

II. CORROSION ET PROTECTION CATHODIQUE DES STRUCTURES EN BETON ARME

A. Le phénomène de corrosion des aciers dans le béton

Plongé dans le béton, l'acier se passive du fait de la forte alcalinité de la solution porale (pH élevé). La passivation est générée par la formation d'une couche d'oxydes fine et dense, qui forme une barrière protectrice entre l'acier et le béton d'enrobage. Cependant, l'équilibre de la couche passive peut être perturbé soit par :

- une acidification de la solution porale du béton du fait de la carbonatation, qui provoque la dissolution de la couche de passivation,
- une attaque par des agents agressifs comme les ions chlorures, qui, en quantité suffisante, peuvent localement détruire la couche passive.

L'endommagement du film passif mène alors à la formation d'un site de corrosion. Au niveau du site de corrosion, l'acier est dit actif tandis que le reste de l'acier demeure à l'état passif. Un courant circule alors entre le site de corrosion (acier actif) et les zones d'acier passif qui l'entourent. Il y a oxydation du fer au niveau du site actif (Equation (1)) qui perd alors des électrons. Ces électrons sont ensuite consommés dans une réaction de réduction du dioxygène (Equation (2)) en surface des sites passifs (Fig. 1).



L'acier est principalement composé d'atomes de fer spatialement structurés, i.e. formant un réseau cristallin. La cohésion de ce réseau est assurée par la mise en commun des électrons de la couche externe de chaque atome de fer. Ces électrons forment ainsi un gaz d'électrons libres (principe de la liaison métallique). Lorsque la couche passive est détruite localement, les propriétés électrochimiques de l'acier sont modifiées au niveau du site actif. En particulier, une différence de potentiel s'établit entre le site actif et les sites passifs environnants. La dépassivation entraîne alors une force électromotrice (différence de potentiel = tension électrique) qui tend à déplacer les électrons libres du site actif vers les sites passifs à l'intérieur de l'acier. La zone active subit ainsi une perte d'électrons, lesquels sont forcés à migrer vers les sites passifs sous l'effet du champ électrique (tension). Ce phénomène entraîne l'affaiblissement de la liaison métallique au niveau du site actif et, subséquemment, la dissolution locale du métal. De manière métaphorique, on peut considérer la corrosion d'une zone d'acier actif comme une hémorragie locale d'électrons.

Les environnements marins sont particulièrement agressifs pour les structures en BA en raison de la présence d'ions chlorure, qui favorisent la dépassivation locale des aciers et l'accélération des cinétiques de corrosion par leur effet sur la résistivité électrique du béton. S'en suit généralement une détérioration rapide du béton d'enrobage du fait de la formation d'oxydes expansifs. Le phénomène est aggravé en zone de marnage du fait de l'alternance de cycles d'humidification-séchage qui favorisent le transport du dioxygène et des ions chlorure vers les aciers d'armature (Abd El Fattah et al., 2018; Costa and Appleton, 2002).

Il existe des techniques de maintenance électrochimique permettant de prolonger significativement la durée de vie des ouvrages en BA sujets à la corrosion des aciers. C'est le cas de la protection cathodique (PC) et de la prévention cathodique (Pedefferri, 1996). Le principe fondamental de la protection cathodique est simple : pour lutter contre une hémorragie d'électrons, la structure est placée sous perfusion d'électrons.

B. La protection cathodique, une technologie de maintenance électrochimique pour lutter contre la corrosion

La protection cathodique est une technique de maintenance électrochimique permettant de lutter contre la corrosion. Elle regroupe aujourd'hui deux technologies ayant prouvé leur efficacité : la protection cathodique par courant imposé (PCCI) et la protection cathodique par courant galvanique (PCCG) (Bertolini et al., 1998). L'objectif de la PC consiste à fournir des électrons en quantité suffisante à la structure corrodée au moyen d'un système anodique, afin de stopper les échanges entre les sites actifs et passifs (Fig. 1). Son application est encadrée par la norme ISO 12696:2022 ("ISO 12696: 2022 - Protection cathodique de l'acier dans le béton," 2022).

La PCCI est basée sur l'utilisation d'anodes inertes, généralement en titane revêtu d'oxydes métalliques mixtes, et connectées à un générateur de courant. Ce dernier force la génération d'électrons en surface de l'anode par l'oxydation de l'eau ou des ions hydroxydes selon le pH de l'électrolyte (Zhang et al., 2018). Dans le cas des structures précontraintes, cette technologie doit être déployée avec prudence car elle s'accompagne d'un risque de sur-polarisation des aciers pouvant mener à un dégagement d'hydrogène et, subséquemment, à une rupture fragile des aciers à haute limite d'élasticité (fragilisation par l'hydrogène). Il existe aussi un risque d'acidification en

zone anodique qui peut affecter négativement les performances de la protection (Hu et al., 2019). Enfin, n'étant pas autonome, la PCCI requiert une connexion permanente au réseau de distribution électrique, entraînant une consommation énergétique pendant toute la durée de vie de la structure. Dans le contexte énergétique actuel, l'augmentation forte des projets de PCCI attendue au cours des prochaines années viendra s'ajouter aux besoins toujours croissants en électricité.

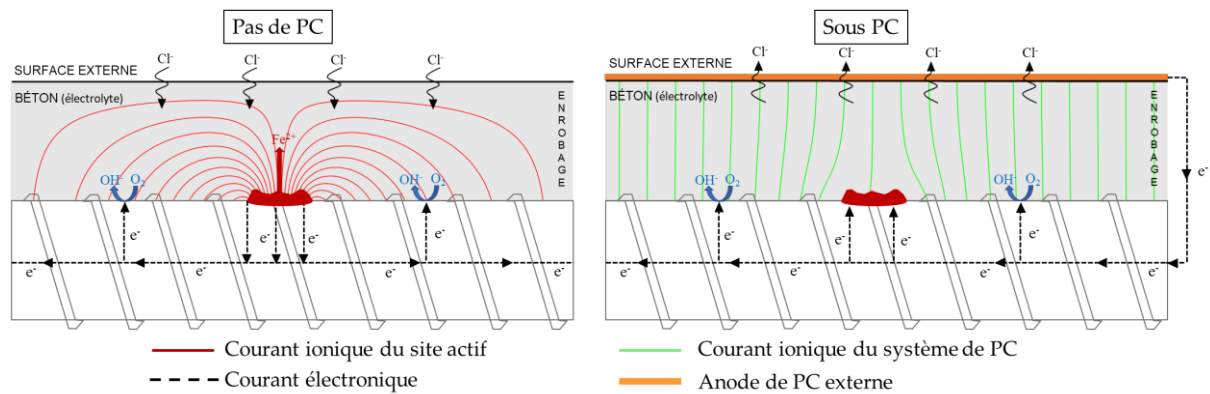


Figure 1. Représentation schématique de la corrosion et de la protection cathodique, illustrant les échanges de courant impliqués (courants électroniques dans l'acier et ioniques dans le béton). La migration des ions chlorures ainsi que l'oxydation du fer et la réduction du dioxygène sont également représentées.

La PCCG est basée sur l'utilisation d'anodes galvaniques composées d'un métal ou alliage dont le potentiel électrochimique est plus électronégatif que celui de l'acier à protéger. On parle d'anodes sacrificielles. Dans le cas de la PC des structures en BA, le zinc ou des alliages de zinc sont utilisés. La différence de potentiel entre le zinc et les aciers conduit à une polarisation anodique du zinc qui s'oxyde et fournit ainsi naturellement des électrons aux armatures. La consommation du zinc conduit cependant au relargage d'oxydes métalliques dans l'environnement. Lorsque la structure est en contact avec l'eau, comme dans les environnements marins, les ions relargués présentent un caractère toxique pour la faune et la flore locales (Imbert-Auvray et al., 2023). De plus, la pérennité des anodes galvaniques est limitée. De par leur rôle sacrificiel, elles doivent être remplacées à échéances régulières selon l'intensité du courant échangé (entre 10 et 25 ans), afin d'assurer la protection de la structure. Le renouvellement régulier des anodes galvaniques nécessite donc l'utilisation de quantités non négligeables de métaux dont la disponibilité est limitée, et implique des processus industriels délétères en matière d'environnement.

II. DES PILES MICROBIENNES BENTHIQUES A LA PROTECTION CATHODIQUE BIOGALVANIQUE

A. Principe de fonctionnement des piles à combustible microbiennes benthiques

Les PCMB permettent d'extraire de l'énergie des fonds marins grâce à des micro-organismes électro-actifs. Grâce à leur métabolisme, ces derniers convertissent l'énergie chimique de leur environnement en énergie électrique (Reimers et al., 2001).

Le principe des PCMB repose sur l'existence d'un gradient de potentiel naturel (spontané) entre des électrodes placées dans des sédiments anoxiques et des électrodes placées dans l'eau de

mer (milieu oxygène). Aujourd'hui, leur fonction consiste généralement à alimenter des systèmes métrologiques situés dans des environnements marins isolés, où l'accès aux sources d'énergie traditionnelles est impossible. Ces systèmes de capteurs sont dédiés à l'acquisition de données environnementales comme la température ou la concentration en dioxygène dissous (Reimers and Wolf, 2018).

Pour réaliser l'anode de la PCMB, une électrode à base d'un matériau conducteur (souvent carboné car inerte) est enfouie dans les sédiments marins où elle est colonisée par des micro-organismes, qui forment spontanément un biofilm à sa surface. Le complexe ainsi formé (électrode + biofilm) est qualifié d'anode microbienne ou bioanode. Ces micro-organismes expriment des propriétés électro-actives (Erable et al., 2010; Lovley, 2006) qui leur permettent de générer des électrons en consommant la matière organique (MO) et divers substrats présents naturellement dans les sédiments. L'anode microbienne est connectée à une cathode constituée d'une autre électrode mise en place dans l'eau de mer. La différence de potentiel spontanée entre ces 2 électrodes situées respectivement en zones anoxique et oxygène permet de générer un courant électrique entre l'anode microbienne et la cathode, courant utilisé pour alimenter le système métrologique isolé (capteurs).

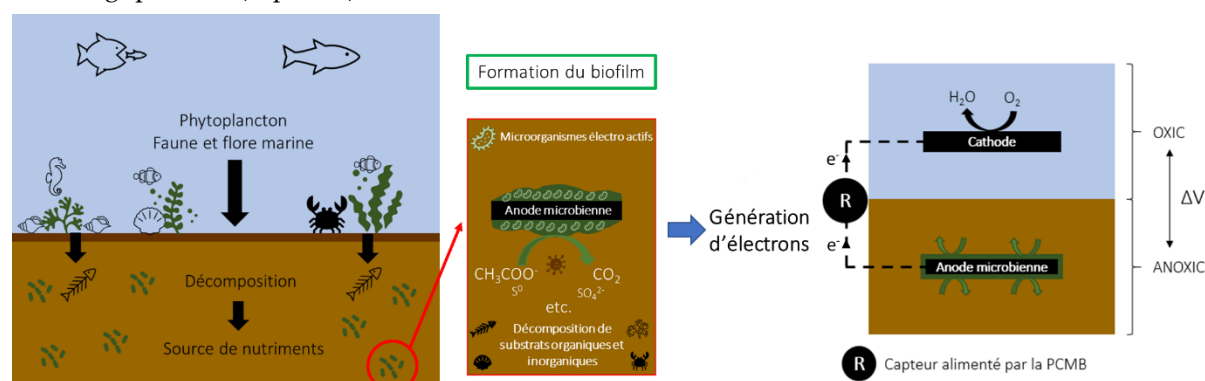


Figure 2. Schématisation du principe de fonctionnement des anodes microbiennes et des piles à combustible microbiennes benthiques.

B. Des piles à combustible microbiennes benthiques à la protection cathodique biogalvanique

La protection cathodique biogalvanique (PCBG) s'inspire de la technologie des PCMB. L'objectif est de générer une PCMB dans laquelle la cathode est constituée par les aciers d'armature de la structure à protéger contre la corrosion.

A l'instar des PCMB, les électrons nécessaires à la maintenance préventive des infrastructures sont fournis par un processus bactérien naturel d'oxydation se développant dans les sédiments marins et qui confère à cette nouvelle technologie un caractère autonome, durable et écologique.

Les espèces chimiques oxydées par les micro-organismes électro-actifs sont des composés inorganiques ou organiques réduits issus des cycles biogéochimiques du soufre et du carbone (Lowy et al., 2006). Ces composés sont le « carburant » de la PCMB. En effet, leur décomposition bio-électrochimique (Rimboud et al., 2014) conduit à la génération d'un flux d'électrons collectés par les anodes, à l'origine d'un courant électrique (Fig. 4). Ces courants électriques sont durables

car le « carburant » nécessaire est continuellement régénéré par des processus naturels dans les sédiments, du fait de la biodégradation des macro- et micro-organismes, de la décomposition des plantes, des algues, etc. Plusieurs PCMB ont produit de l'électricité en continu pendant plus d'un an (Reimers et al., 2022; Reimers and Wolf, 2018).

La PCBG constitue ainsi une alternative ou un complément aux technologies actuelles de protection cathodique. Son intérêt repose sur le caractère renouvelable à l'infini, gratuit et écoresponsable de l'énergie électrique produite par le système bactérien, nécessaire pour protéger la structure contre la corrosion. Cette nouvelle technologie se pose ainsi comme l'une des nombreuses réponses à apporter aux différents défis de l'industrie de la construction. Elle permet d'agir sur la réduction de la consommation d'énergie et de ressources naturelles en augmentant la durée de vie des ouvrages et s'affranchit des désavantages de la PCCI et la PCCG.

III. ETUDE EXPERIMENTALE DE LA PCBG SUR UN PILOTE DE LABORATOIRE

Les potentialités de la PCBG ont été étudiées à l'aide d'un pilote de laboratoire (Fig. 3). Une pile en béton de 3 mètres a été conçue et immergée dans un réservoir contenant 60 cm de sédiments marins naturels (Gruissan, France) et de l'eau de mer naturelle sur une hauteur d'un mètre environ. Le dispositif expérimental vise à répliquer les conditions d'exposition d'une structure en BA semi-immersée en environnement marin. Des anodes microbiennes ont été enfouies dans les sédiments puis connectées aux aciers présents dans la pile. Le pilote est instrumenté au moyen d'une centrale d'acquisition (Keysight) afin de mesurer le courant échangé entre les anodes microbiennes et le réseau d'aciers.

De manière à pouvoir observer la distribution du courant de protection vers les aciers dans la hauteur de la pile, les armatures ont été discrétisées en segments disjoints. Ainsi, les segments d'acier sont répartis sur la hauteur de la pile en 20 niveaux et en 4 colonnes. La continuité du réseau d'armatures a été rétablie extérieurement via des câbles électriques connectés aux segments d'acier et permettant de mesurer les courants reçus par chaque segment à l'aide de la centrale d'acquisition et de shunts de mesure. La Fig. 3 présente la distribution des segments d'acier dans la hauteur et un schéma de principe de la PCBG appliquée au pilote.

Les performances de ce système expérimental de PCBG, en matière de densités de courant reçues par les différents segments d'acier, ont été monitorées en continu afin d'apprécier leur évolution dans le temps. La Fig. 4 permet d'apprécier l'allure de la distribution des densités de courant dans la hauteur de la pile. Ici, l'étude a été réalisée en ne mobilisant qu'une colonne d'acier parmi les 4 présentes dans la pile, avec un ratio entre la surface anodique et cathodique de 0.3. Qualitativement, on observe un pic de courant de protection au niveau de la zone de marnage et d'éclaboussure. Le courant de protection se concentre naturellement dans cette zone qui, comme indiqué précédemment est fortement critique vis-à-vis des risques de corrosion. Elle s'inscrit en effet dans la classe d'exposition XS3 selon la norme EN/206 (Fig. 3). Cette concentration naturelle du courant de protection vers les aciers de la zone de marnage constitue un résultat très positif en vue de l'application de la PCBG comme technologie de maintenance préventive contre la corrosion.

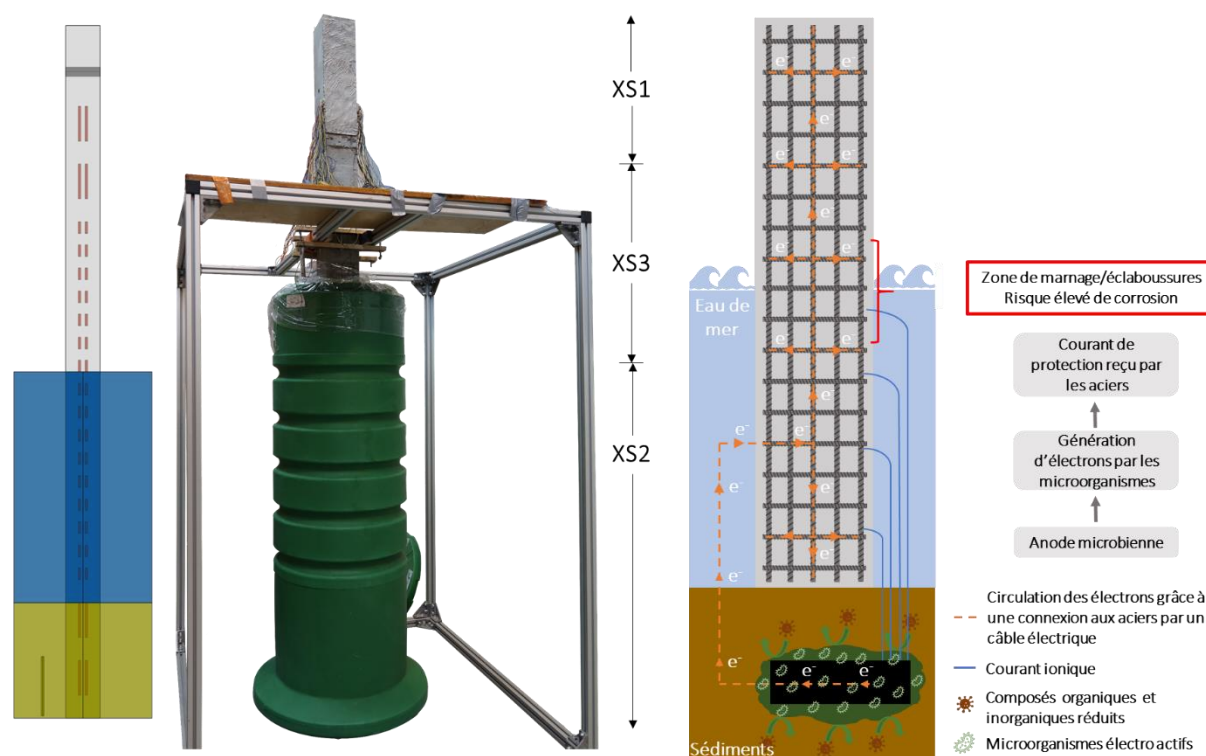


Figure 3. Présentation du pilote expérimental de laboratoire et du principe de fonctionnement de la protection cathodique biogalvanique.

La Fig.4 montre également qu'au cours des premiers mois de fonctionnement de la PCBG, les courants mesurés sont significatifs. On observe notamment un pic de courant après 2 mois à environ $4,5 \text{ mA/m}^2$, qui s'inscrit dans la gamme des courants de protection selon la norme ISO 12696:2022. Une majorité des segments dans la zone de marnage sont dans la gamme de protection ($2\text{-}20 \text{ mA/m}^2$ d'acier). Les autres segments se trouvent dans la gamme de prévention cathodique ($0,2\text{-}2 \text{ mA/m}^2$ d'acier) mentionnée par la norme. Après 17 mois de fonctionnement, on peut cependant observer une chute significative des densités de courant de protection reçues, possiblement liée aux variations de température ou l'épuisement de la MO. La tendance de distribution dans la hauteur demeure quant à elle inchangée, avec un pic toujours situé dans la zone de marnage. Les densités de courant observées s'inscrivent tout de même dans la gamme de prévention cathodique pour l'ensemble des tronçons jusqu'à environ 2 m, à savoir la frontière entre la zone de marnage et la zone exposée à l'air. Ainsi, après environ 1 an et demi de fonctionnement en laboratoire, c'est-à-dire en système fermé et sans renouvellement de la MO, le système de PCBG permet de fournir un courant de prévention significatif à la pile semi-immersée. Ces dernières remarques conduisent enfin à un questionnement relatif à la gestion de l'appauvrissement des sédiments en MO (carburant de la pile). Cette question constitue l'un des axes d'étude de la suite de ces travaux.

La faisabilité de la PCBG a également été éprouvée en conditions réelles (Fig.5). 12 bioanodes ont été préalablement installées sur un piquet en PVC (Fig.5-A), puis enfouies jusqu'à un mètre de profondeur dans la couche sédimentaire d'un bassin ostréicole (Fig.5-B). Cet essai s'est révélé particulièrement concluant car, après environ 20 jours de formation du biofilm, les potentiels naturels de l'ensemble des bioanodes ont atteint une gamme de valeurs propices à une protection cathodique galvanique efficace, de l'ordre de -600 à $-700 \text{ mV vs Ag/AgCl/Eau de Mer}$ (Fig.5-C).

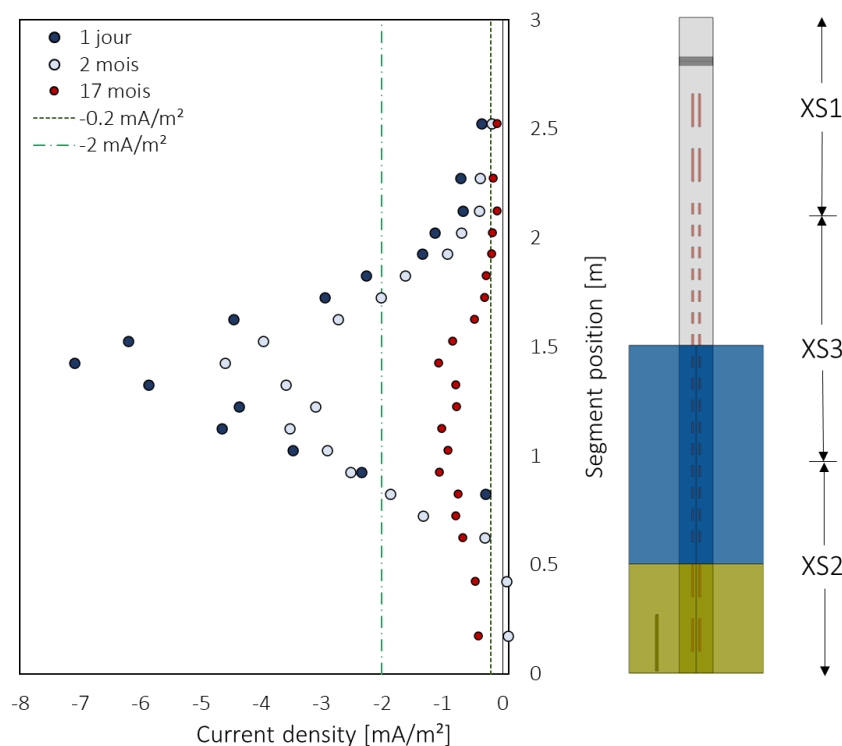


Figure 4. Evolution de la distribution de la densité de courant de protection fourni par l'anode microbienne dans le temps. Un pic de courant est visible dans la zone de marnage, à savoir la zone correspondant à la classe d'exposition XS3. Les gammes de courant de protection (2-20 mA/m² d'acier) et de prévention (0,2-2 mA/m² d'acier) recommandées par la norme de protection cathodique ISO 12696:2022 sont indiquées respectivement en tirets verts et pointillés bleus. Les densités de courant sont négatives car, par convention, le courant fourni par l'anode est positif et le courant reçu par les aciers est négatif.

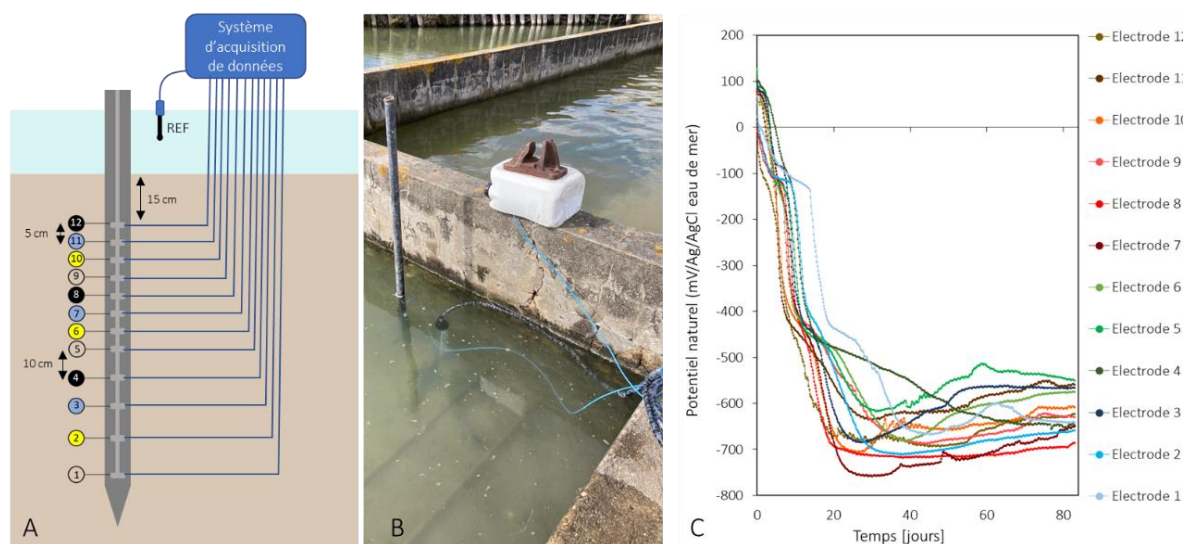


Figure 5. Expérimentation in situ dédiée à la mesure des potentiels naturels de bioanodes en conditions sédimentaires réelles et à différentes profondeurs.

Les expérimentations conduites en laboratoire et in situ sont par ailleurs complétées par des travaux de modélisation et de simulation numérique, dans le but de développer en parallèle des outils de conception assistée par ordinateur des futurs systèmes de PCBG (Dubuit et al., 2023).

IV. CONCLUSION

La protection cathodique biogalvanique (PCBG) constitue une alternative nouvelle et écoresponsable aux technologies actuelles de maintenance anticorrosion des structures en béton armé en environnement marin. Elle s'inspire de travaux récents réalisés dans le domaine des piles à combustible microbiennes benthiques (PCMB). Un pilote expérimental de laboratoire a montré la capacité d'anodes microbiennes enfouies dans des sédiments marins à générer des niveaux de courant de protection cathodique significatifs, suffisants pour préserver une structure en béton armé partiellement immergée en eau de mer. De plus, le courant de protection fourni aux aciers se concentre naturellement dans la zone de marnage de la structure, à savoir la zone la plus critique vis-à-vis du risque de corrosion. Au cours des premiers mois de fonctionnement de la technologie, les densités de courant de protection observées s'inscrivent dans la gamme de protection cathodique selon la norme ISO 12696:2022. Une diminution des densités de courant est ensuite observée, passant alors dans la gamme de prévention cathodique. On note que cette diminution de l'efficacité de la PCBG est probablement imputable aux conditions de laboratoire (milieu fermé), dans lesquelles la matière organique (carburant de la PCMB) n'est pas naturellement renouvelée. Enfin, les premiers tests de PCBG en conditions réelles ont montré que les potentiels naturels des bioanodes étaient suffisamment électronégatifs pour envisager une protection cathodique biogalvanique efficace de structures en béton armé en environnement marin. Le corpus de résultats expérimentaux et numériques obtenus au cours de ces travaux confirme les potentialités de cette nouvelle technologie de maintenance bio-électrochimique en matière d'anticorrosion.

REFERENCES

- Abd El Fattah, A., Al-Duais, I., Riding, K., Thomas, M., 2018. Field evaluation of corrosion mitigation on reinforced concrete in marine exposure conditions. *Construction and Building Materials* 165, 663–674. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.077>
- Angst, U.M., 2018. Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete. *Mater Struct* 51, 4. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1131-6>
- Bertolini, L., Bolzoni, F., Pedeferri, P., Lazzari, L., Pastore, T., 1998. Cathodic protection and cathodic prevention in concrete: principles and applications. *Journal of Applied Electrochemistry* 28, 1321–1331. <https://doi.org/10.1023/A:1003404428827>
- Costa, A., Appleton, J., 2002. Case studies of concrete deterioration in a marine environment in Portugal. *Cement and Concrete Composites, CORROSION AND CORROSION MONITORING* 24, 169–179. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00037-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00037-3)
- Dubuit, J., Laurens, S., Bertron, A., Garcia, D., Etcheverry, L., Deby, F., Erable, B., 2023. Biogalvanic cathodic protection of reinforced concrete structures in marine environments. *Construction and Building Materials* 403, 133180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133180>
- Erable, B., Duțeanu, N.M., Ghangrekar, M.M., Dumas, C., Scott, K., 2010. Application of electro-active biofilms. *Biofouling* 26, 57–71. <https://doi.org/10.1080/08927010903161281>

- François, R., Laurens, S., Deby, F., 2018. Corrosion and its Consequences for Reinforced Concrete Structures. Elsevier.
- Gagg, C.R., 2014. Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. *Engineering Failure Analysis* 40, 114–140.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>
- Hu, J., Wang, Y., Zhang, Z., Guo, W., Ma, Y., Zhu, W., Wei, J., Yu, Q., 2019. Evaluation on the acidification damage of the external anode mortar induced by impressed current cathodic protection. *Construction and Building Materials* 229, 116869.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116869>
- Imbert-Auvray, N., Fichet, D., Bodet, P.-E., Ory, P., Sabot, R., Refait, P., Graber, M., 2023. Metabolomics-Based Investigation on the Metabolic Changes in *Crassostrea gigas* Experimentally Exposed to Galvanic Anodes. *Metabolites* 13, 869.
<https://doi.org/10.3390/metabo13070869>
- ISO 12696: 2022 - Protection cathodique de l'acier dans le béton, 2022.
- Koch, G., 2017. 1 - Cost of corrosion, in: El-Sherik, A.M. (Ed.), *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies*, Woodhead Publishing Series in Energy. Woodhead Publishing, Boston, pp. 3–30. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00001-2>
- Lovley, D.R., 2006. Bug juice: harvesting electricity with microorganisms. *Nat Rev Microbiol* 4, 497–508. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1442>
- Lowy, D.A., Tender, L.M., Zeikus, J.G., Park, D.H., Lovley, D.R., 2006. Harvesting energy from the marine sediment–water interface II: Kinetic activity of anode materials. *Biosensors and Bioelectronics* 21, 2058–2063. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2006.01.033>
- Miller, S.A., Horvath, A., Monteiro, P.J.M., 2016. Readily implementable techniques can cut annual CO₂ emissions from the production of concrete by over 20%. *Environ. Res. Lett.* 11, 074029. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074029>
- Nations Unies, 2020. Objectifs de développement durable. New York: Nations Unies.
- Pedefferri, P., 1996. Cathodic protection and cathodic prevention. *Construction and Building Materials, Durability of Reinforced Concrete Structures* 10, 391–402.
[https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00017-8](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00017-8)
- Reimers, C.E., Tender, L.M., Fertig, S., Wang, W., 2001. Harvesting energy from the marine sediment–water interface. *Environ. Sci. Technol.* 35, 192–195.
<https://doi.org/10.1021/es001223s>
- Reimers, C.E., Wolf, M., 2018. Power from Benthic Microbial Fuel Cells Drives Autonomous Sensors and Acoustic Modems. *Oceanography* 31, 98–103.
- Reimers, C.E., Wolf, M., Alleau, Y., Li, C., 2022. Benthic microbial fuel cell systems for marine applications. *Journal of Power Sources* 522, 231033.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231033>
- Rimboud, M., Pocaznoi, D., Erable, B., Bergel, A., 2014. Electroanalysis of microbial anodes for bioelectrochemical systems: basics, progress and perspectives. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 16, 16349–16366. <https://doi.org/10.1039/C4CP01698J>
- Zabihallahpoor, A., Rahimnejad, M., Talebnia, F., 2015. Sediment microbial fuel cells as a new source of renewable and sustainable energy: present status and future prospects. *RSC Adv.* 5, 94171–94183. <https://doi.org/10.1039/C5RA15279H>
- Zhang, E.Q., Abbas, Z., Tang, L., 2018. Predicting degradation of the anode–concrete interface for impressed current cathodic protection in concrete. *Construction and Building Materials* 185, 57–68. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.025>