Les métaux relargués par les anodes sacrificielles des parcs éoliens en mer présentent-ils un risque pour l'écosystème marin ?

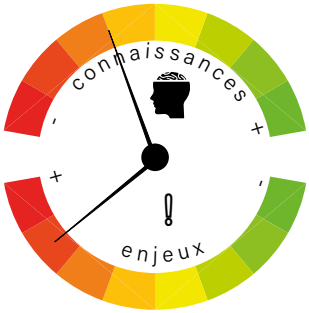
Bulletin n°8

Juin 2023

COME3T

Le **LABEL COME3T** valorise les projets de recherche visant à améliorer les connaissances des enjeux environnementaux et socio-économiques liés au développement des énergies marines renouvelables.

Il s'inscrit dans l'initiative COME3T, COMité d'Expertise pour les Enjeux EnvironnemenTaux des énergies marines renouvelables, qui réunit des experts neutres et indépendants pour apporter des éléments de connaissances scientifiques et des recommandations en réponse à ces enjeux.



Problématique jugée comme « à enjeu élevé au regard des préoccupations de la société civile et de l'état actuel des connaissances jugé peu élevé dû à la difficulté d'avoir des seuils d'effets (PNEC) robustes (fiables) pour certaines substances »

Experts scientifiques

Isabelle AMOUROUX - Analyse des risques chimiques et des contaminations en milieu marin (Ifremer)

Emmanuel ARAGON - Vieillissement des matériaux et corrosion en milieu marin (Université de Toulon)

Christelle CAPLAT - Étude de la toxicité des métaux sur les organismes marins (Université de Caen-Normandie)

Jean-Louis GONZALEZ - Échantillonnage passif, mesure de la concentration des contaminants chimiques (Ifremer)

Nicolas MICHELET - Modélisation et dynamique des fonds marins (France Énergies Marines)

Georges SAFI - Approche écosystémique, interactions écosystèmes et EMR (France Énergies Marines)

*Avec la participation de **Rui Duarte** (France Énergies Marines) et **Thierry Burgeot** (Ifremer), coordinateurs scientifiques du projet ANODE (Evaluation quantitative des métaux libérés dans le milieu marin et issus des anodes galvaniques des structures EMR).*

Coordination, synthèse et rédaction

Sybill HENRY - France Énergies Marines

Introduction

L'utilisation des systèmes de protection cathodique contre la corrosion n'est pas nouvelle en milieu marin. Ils sont couramment utilisés pour assurer la protection des navires, des infrastructures maritimes et portuaires, etc. Cependant, le développement des parcs éoliens en mer concentre les préoccupations environnementales portant sur le sujet de la part des autorités publiques et du grand public, notamment sur les risques de pollutions métalliques et de leurs impacts potentiels sur la qualité de l'eau et le bon fonctionnement des écosystèmes marins.

Afin de mieux comprendre les risques pour l'environnement marin associés à l'installation de ces systèmes de lutte contre la corrosion, le projet ANODE[1], mené entre 2019 et 2020, avait deux principaux objectifs :

- Évaluer les composés chimiques émis par les anodes associées au développement des parcs éoliens en mer
- Quantifier les risques associés à la dispersion de ces composés chimiques dans le milieu marin pour les organismes vivants dans la colonne d'eau.

Ce bulletin, construit en concertation avec les experts, présente les principaux résultats issus de ce projet.

Anodes galvaniques sur une fondation d'éolienne de type jacket

[1] Projet ANODE, Evaluation quantitative des métaux libérés dans le milieu marin et issus des anodes galvaniques des structures EMR.

Définitions

Ion

Un ion est un atome ou un groupe d'atomes (molécules) chargé électriquement après avoir gagné ou perdu un ou plusieurs **électrons** (particules élémentaires de charge négative). Il existe deux catégories d'ions : les cations, chargés positivement, et les anions, chargés négativement.

Anode et cathode

L'**anode** est le nom donné à l'électrode sur laquelle se produit une réaction chimique dite d'oxydation, qui libère des électrons. Une réaction d'oxydation est toujours associée à une réaction de réduction. Cette réaction à lieu à la surface d'une **cathode**, nom donné à l'électrode qui consomme les électrons produits à l'anode. La différence de potentiel électrique entre anode et cathode induit un courant électrique qui circule, en sens inverse, de l'anode vers la cathode dans un milieu riche en **électrolytes**, c'est-à-dire en minéraux (comme le sodium, le potassium ou le calcium) capables de transporter une charge électrique lorsqu'ils sont dissous dans un liquide tel que l'eau de mer.

Polarisation

La polarisation correspond à la séparation des charges électriques d'un corps ou d'une solution, qui se traduit par une différence de **potentiel électrique** entre deux électrodes. Du fait de cette différence de potentiel, anode et cathode sont des surfaces polarisées.

Conductivité

Capacité d'un milieu (conducteur électronique ou ionique) à être traversé par un courant électrique, exprimée en Siemens (S) en fonction de la distance (S/m). L'inverse est la **résistivité**, soit l'aptitude à s'opposer à la circulation d'un courant électrique, exprimée en Ohms (Ω) en fonction de la distance (Ω.m).

Spéciation

La **spéciation** d'un contaminant représente l'ensemble des différentes « formes » (dissoutes et particulaires) sous lesquelles le composé est présent dans un environnement donné. La spéciation dépendra des propriétés physico-chimiques du composé et du milieu (pH, concentration en matières en suspension, nature de ces particules, etc.).

Anodes galvaniques sur une fondation d'éolienne de type jacket

© France Energies Marines

Potentiel de corrosion

Le **potentiel de corrosion** permet de distinguer les métaux en fonction de leur résistance à la corrosion. Pour un milieu donné, plus le potentiel de corrosion d'un métal est élevé, plus le métal sera considéré comme « noble » (Fig. 1). Parmi les métaux les plus nobles (c'est-à-dire les plus résistants à la corrosion) on trouve notamment l'or, l'argent ou le platine.

Risque chimique

Correspond à la probabilité d'occurrence d'un effet indésirable ou nocif sur une espèce ou un groupe d'espèces lors d'une exposition à une substance chimique. Le **risque** chimique dépend de deux notions distinctes : le **danger** et l'**exposition**. Une diminution de l'exposition et/ou du danger peut diminuer le risque.

Danger

Capacité intrinsèque d'une substance à causer des effets indésirables ou nocifs sur une espèce ou un groupe d'espèces.

Exposition

Niveau auquel les individus d'une ou plusieurs espèces sont soumis à une substance chimique.

Sensibilité

La sensibilité d'un compartiment biologique ou d'une espèce est définie par sa capacité à tolérer des modifications du milieu (résistance) et au temps nécessaire à sa récupération suite à ces modifications (résilience)[2].

Écotoxicité

Désigne l'effet néfaste d'une (ou plusieurs) substance(s) chimique(s) sur les organismes vivants et sur l'écosystème dans son ensemble.

Pélagique

Un organisme **pélagique** est un organisme dont tout ou partie de son cycle de vie est réalisé en nageant (cas de nombreux poissons) ou en flottant (cas du plancton ou de nombreuses larves d'espèces marines) dans la colonne d'eau.

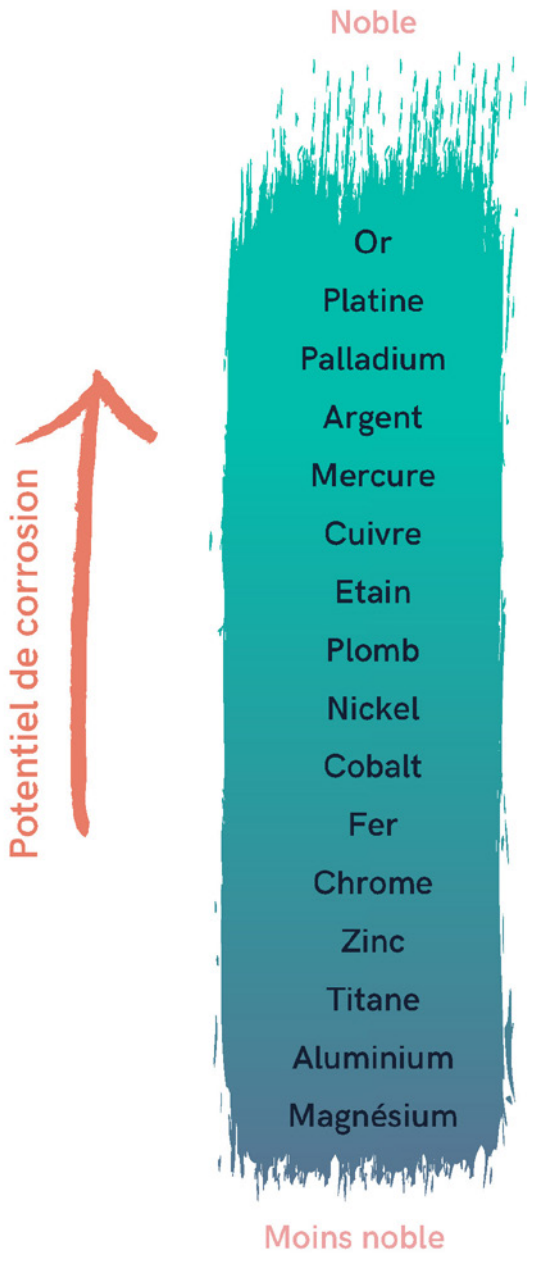


Fig. 1 *Schéma du classement de différents métaux selon leur potentiel de corrosion dans un milieu de type « eau de mer ». D'après la définition de la corrosion de l'AFICPAR* [3].

Benthique

Un organisme **benthique** est un organisme qui passe la plus grande partie de son cycle de vie (voir son cycle de vie entier) sur ou à proximité du fond ou dans le sédiment.

Biote

Le biote correspond à l'ensemble des organismes vivants (faune et flore) d'un milieu ou d'un habitat donné.

[2] Définition reprise des travaux du GT ECUME (groupe de travail sur les effets cumulés) du Ministère en charge de l'environnement et dérivée de l'arrêté du 17 décembre 2012 relatif à la définition du bon état écologique.

[3] AFICPAR : Académie Francophone des Inspecteurs Certifiés dans la Protection Anticorrosion par Revêtements

Quelques principes

Corrosion sur une surface metallique

Qu'est-ce que la corrosion ?

Du latin *corrodere* qui signifie "ronger, attaquer", la corrosion est un phénomène naturel qui résulte de l'interaction entre un métal et son environnement. Cette interaction entraine une dégradation du métal qui conduit à une modification de ses propriétés. La durabilité des métaux dans un environnement dépend de leur tenue mécanique (fatigue, érosion, etc.) et de leur résistance à la corrosion. Elle est importante à prendre en compte lors du dimensionnement d'une infrastructure. La corrosion peut en effet générer un surcoût économique en raison du remplacement ou de la réparation des matériaux corrodés, à la mise en place de mesures de protection (revêtement, etc.) ou de prévention (surdimensionnement des structures, entretien, etc.). En milieu marin, la corrosion des métaux par l'eau de mer est connue depuis le XVe siècle où des voies d'eau survenaient sur les bateaux à charpente en bois. Le diamètre des clous en contact avec l'eau de mer devenait de plus en plus faible au fil des années du fait de la corrosion. Dans l'eau de mer, la corrosion des métaux est dite **électrochimique**, c'est-à-dire qu'elle provoque une réaction chimique à l'origine d'un transfert d'électron. On parle alors de **réaction d'oxydo-réduction**. Irréversible, cette réaction à lieu entre un métal et un agent dit "oxydant" de l'environnement :

métal + agent oxydant > métal oxydé + agent réducteur

Dans cette réaction, l'élément chimique qui capte l'électron est nommé **oxydant** et celui qui le cède est appelé **réducteur**. En milieu marin, le principal agent oxydant est l'oxygène dissous.

Le cas de l'acier

Composé à 99 % de fer, l'acier est le matériau le plus utilisé par l'industrie maritime. Dans le cas de l'acier, la corrosion du métal se traduit par deux réactions simultanées :

- une **réaction d'oxydation (a)** qui transforme le fer (Fe) en ion ferreux (Fe^{2+}) et libère deux électrons ($2e^-$) ;
- une **réaction de réduction (b)** où les deux électrons ($2e^-$) sont utilisés par des molécules d'eau (H_2O) et d'oxygène dissous dans l'eau de mer (O_2) pour former des ions hydroxydes (OH^-). A la surface du métal en contact avec l'eau de mer, ces deux réactions ont lieu simultanément et la libération des électrons conduit à la création d'un courant électrique allant, dans l'électrolyte, de la zone de libération des ions Fe^{2+}, dite **anodique**, vers la zone de captation de ces électrons, appelée zone **cathodique**.

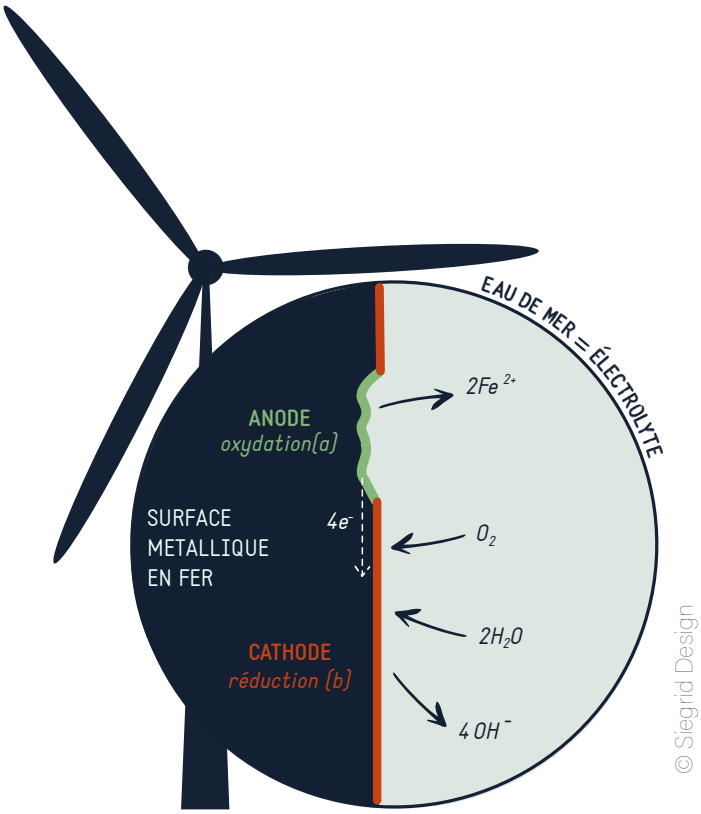


Fig. 2 *Schéma de la réaction d'oxydo-réduction du fer (composant majeur de l'acier) en milieu marin.*

Riche en contenu ionique, l'eau de mer permet la circulation du courant et la dissolution des ions ferreux (Fe^{2+}) et des ions hydroxyde (OH^-). Ces ions permettent ainsi la formation d'hydroxyde de fer ($Fe(OH)_3$) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3) et sont à l'origine d'un produit solide et visible de corrosion, la **rouille**. (Fig 2).

Le degré de corrosion des métaux est différent selon que la structure est immergée en permanence, en alternance (zone soumise aux cycles de marée par exemple) ou pour les parties aériennes, soumises à des éclaboussures ou à des phases de condensation.

Lutter contre la corrosion

Quels sont les moyens de protection contre la corrosion ?

Pour réduire les risques de corrosion des infrastructures installées en mer, plusieurs systèmes de protection et de prévention sont utilisés et souvent même couplés. Ils sont utilisés depuis longtemps par différents secteurs d'activité maritime (transport, sécurité maritime, gestion portuaire) et peuvent être regroupés en différentes catégories[4] :

- Les **revêtements** de protection regroupent les revêtements dit « organiques », comme les peintures anticorrosion, par exemple, et les revêtements métalliques (formés le plus souvent d'un métal moins noble que l'acier comme le zinc). Ces revêtements peuvent être appliqués en usine avant assemblage de la structure ou sur site, notamment lors des opérations de maintenance pour protéger les structures immergées ou émergées ;
- Le **design** qui repose sur une conception des infrastructures qui réduit les risques de corrosion en limitant les zones de stagnation de l'eau de mer et en facilitant les écoulements d'eau ;
- Le **surdimensionnement** des structures qui permet de considérer les pertes de matière générées par la corrosion sur toute la durée de vie de l'infrastructure. Il est souvent utilisé pour prévenir la corrosion des infrastructures portuaires sans recourir à des systèmes de protection spécifiques mais plutôt à des contrôles périodiques et d'éventuelles maintenance ;
- Les protections **cathodiques** qui visent à diminuer le potentiel de corrosion des structures immergées pour les protéger, grâce à l'installation d'anodes qui peuvent être sacrificielles ou associées à une source de courant extérieur (courant imposé). Très utilisées dans le domaine maritime (navires de commerce, transport de marchandises, infrastructures portuaires, plateformes pétrolières, etc.), le fonctionnement de ces deux systèmes de protection est détaillé plus loin dans le document.

Quels systèmes de protection sont utilisés au sein des parcs éoliens en mer ?

© Thomas / Pixabay

Parc éolien en mer

Comme n'importe quelle activité anthropique qui nécessite l'installation d'infrastructures en mer, le développement des parcs éoliens doit tenir compte des risques de corrosion dans le dimensionnement des infrastructures, en particulier celles qui seront en contact permanent avec l'eau de mer.

Les différents types de fondations utilisées pour l'éolien posé (monopieu, jacket, gravitaire – structure en béton armé contenant de l'acier) et les flotteurs de l'éolien flottant (barge en acier ou en béton armé contenant de l'acier) sont majoritairement composés d'**acier** pour des raisons techniques et économiques. En effet, l'acier est un matériau facile à travailler dont la haute résistance mécanique permet de résister à de fortes contraintes. Il est donc idéal dans un environnement marin soumis à des contraintes naturelles (vagues, vent, marée) pouvant être importantes (tempête hivernale, etc.). Sa résistance lui permet de supporter des poids élevés et il est disponible en abondance.

[4] D'après Parant, L., (2012). La corrosion, un fléau pour les navires. Dossier technologies. In Production maintenance, pp25-28

Réutilisable (refonte possible sans altération de ses propriétés), c'est un matériau durable dans le temps qui est donc intéressant pour les investissements à long terme, eu égard à la durée de vie prévue des parcs éoliens en mer (25 à 30 ans, en moyenne).

S'il offre de nombreux avantages, l'acier reste un métal qui, en contact constant avec l'eau de mer (fondations et partie immergée des flotteurs), est soumis au phénomène de **corrosion**. C'est en prévision de ce risque que des systèmes de protection contre la corrosion sont installés au sein des parcs éoliens en mer. Les **systèmes de protection cathodique**, associés ou non à des systèmes de peintures anticorrosion, y sont privilégiés.

Les protections cathodiques à courant imposé

Aussi appelées ICCP (pour Impressed Current Cathodic Protection), les systèmes de protection cathodique à courant imposé dépendent d'une alimentation électrique. Elle permet la création d'un **courant électrique continu** entre la structure à protéger et une anode auxiliaire. D'un métal noble dont le potentiel électrochimique est élevé (résistant à l'usure et la corrosion), cette anode est reliée à la borne positive d'un générateur tandis que la structure à protéger est reliée à la borne négative (Fig. 3).

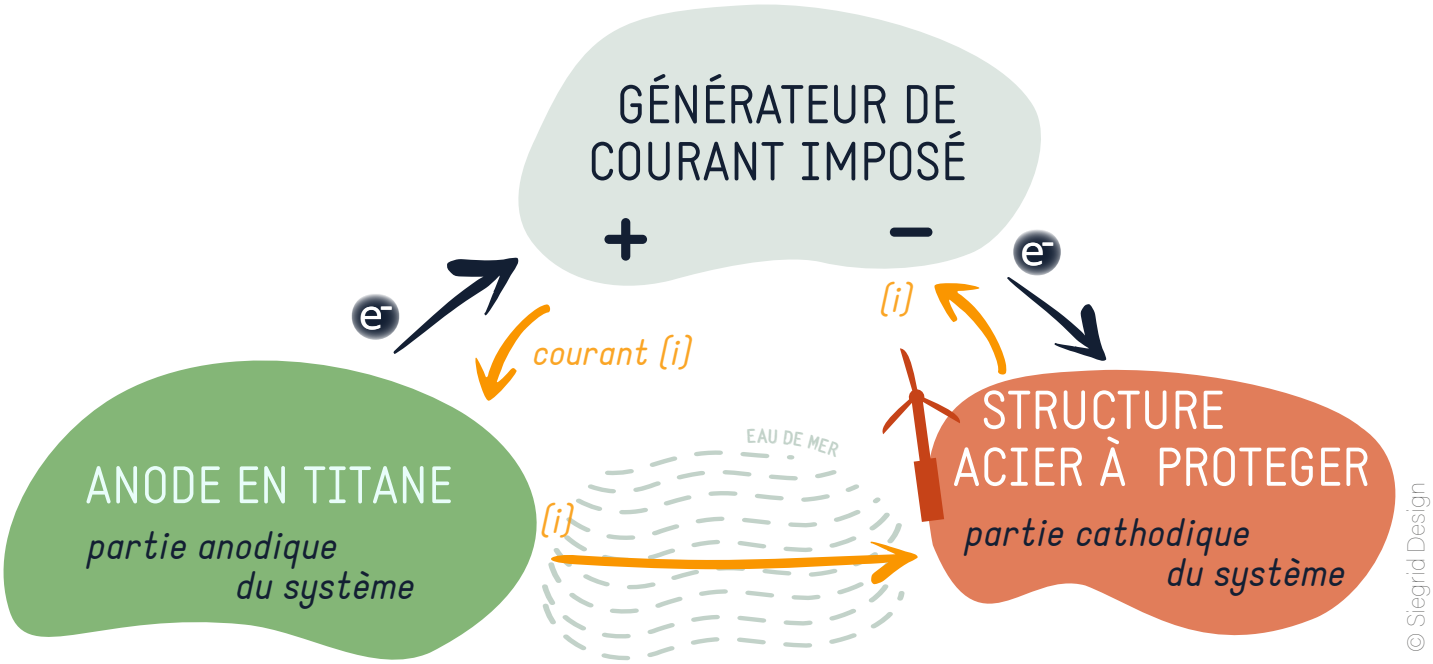


Fig. 3 *Schéma du fonctionnement d'une protection cathodique à courant imposé ou ICCP.*

Ce courant électrique va permettre de **polariser artificiellement** la surface de la structure à protéger en imposant un potentiel afin de supprimer l'oxydation naturelle. En fonction de l'intensité du courant, la structure sera plus ou moins protégée (dans le cas d'un courant insuffisant, la corrosion sera plus lente mais toujours présente et la structure ne sera donc que partiellement protégée). Généralement, le générateur électrique est installé sur la structure à protéger et présente l'avantage de pouvoir ajuster la production électrique en fonction de la résistivité du milieu.

Les ICCP offrent ainsi une protection à long terme et peuvent couvrir une large surface immergée. En revanche, elles requièrent une alimentation électrique constante et une surveillance plus importante eu égard au risque de perte d'efficacité du système en cas de perte ou défaut de fonctionnement du système.

Les anodes sacrificielles ou galvaniques

Aussi appelées GACP (pour Galvanic Anode Cathodic Protection), la mise en place de protections cathodiques de ce type se traduit par l'installation sur la structure à protéger, d'**anodes galvaniques** composées d'un métal moins noble que l'acier (majoritairement du zinc ou un alliage d'aluminium) dont le potentiel électrochimique est plus faible. En milieu conducteur, la réaction d'oxydation aura donc lieu sur le métal ayant le potentiel le plus électronégatif et induira une **polarisation cathodique** de la structure à protéger. L'anode sera alors corrodée au bénéfice de la structure à protéger. C'est en cela que l'on parle d'**anode sacrificielle**, pour désigner ce type de système de protection (Fig. 4).

Anodes galvaniques sur une coque de navire

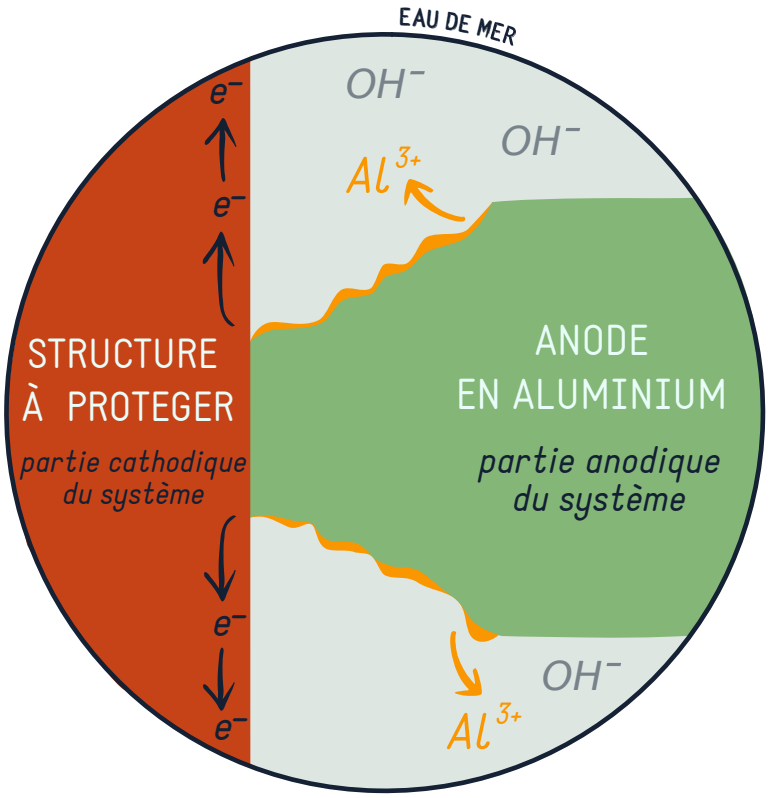


Fig. 4 *Schéma du fonctionnement d'une protection cathodique galvanique ou GACP.*

En mer, les GACP sont utilisées pour lutter contre la corrosion des installations portuaires, des structures offshores et des coques de navires en utilisant des anodes à base d'aluminium ou de zinc. Pour les structures offshores, les anodes en aluminium sont majoritairement utilisées en raison de leur capacité électrochimique. Ces anodes **sont soumises à des normes[5] qui fixent, entre autres, les exigences de qualité et la composition**.

Lorsque le design (géométrie et surface) des structures à protéger est connu, l'estimation de la quantité d'anodes à installer est nécessaire. Cela permet de déterminer la fraction d'anodes galvaniques qui sera consommée pendant toute la durée de vie du projet et d'estimer ainsi le pourcentage de masse qui sera « sacrifié ». Pour une protection optimale, ces anodes doivent (i) être placées à distance suffisante des unes des autres pour que la totalité de la surface de la structure soit correctement protégée et pour éviter les effets d'interaction qui peuvent réduire la capacité de polarisation et (ii) ne doivent pas être installées à proximité d'une soudure ou d'une zone soumise à de fortes contraintes. Ce genre de système de protection est assez simple dans son principe et son dimensionnement et ne nécessite pas de surveillance constante. En revanche, il requiert un nombre élevé d'anodes et peut contribuer à augmenter le poids des structures.

[5] NF EN 12496. Normes françaises et européennes en vigueur sur les anodes galvaniques pour la protection cathodique dans l'eau de mer et les boues salines. Normes AFNOR (https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-12496/anodes-galvaniques-pour-la-protection-cathodique-dans-leau-de-mer-et-les-bo/fa150108/41877)

Le projet ANODE

Mené entre 2019 et 2020, le projet ANODE avait pour principal objectif de caractériser les risques associés aux contaminants chimiques susceptibles d'être relargués par des anodes galvaniques, et plus spécifiquement par celles à base d'aluminium. Une démarche d'**évaluation des risques chimiques** a alors été menée afin de déterminer si les substances chimiques rejetées par les anodes galvaniques (GACP) peuvent présenter un risque pour l'environnement marin. Cette évaluation du risque chimique est réalisée substance par substance. Elle est basée sur la comparaison de deux critères pour tous les compartiments environnementaux pertinents (colonne d'eau, sédiments et biote pour le milieu marin) :

- La concentration prédite ou mesurée dans le milieu d'un contaminant, appelée « concentration environnementale prédite » ou PEC (« *Predicted environmental concentration* ») ;
- La concentration prédite sans effet ou PNEC (« *Predictive no effect concentration* »)

Cette démarche s'inscrit dans un processus itératif dont la première étape est basée sur une approche dite du « pire cas » afin d'assurer un niveau de protection élevé pour l'environnement marin.

Dans le cadre du projet ANODE, l'évaluation des risques a été menée sur la colonne d'eau uniquement. Les informations présentées ci-après reprennent les résultats issus (i) de la modélisation de la dispersion des métaux dans le milieu marin et (ii) de l'évaluation des risques associées. Le cas d'étude retenu est le site d'implantation du parc éolien en mer de Courseulles-sur-Mer (France, Normandie), témoin d'une zone soumise aux courants sous influence des marées.

L'étude s'est focalisée sur la colonne d'eau car :

- Il s'agit du compartiment au sein duquel les substances métalliques issues des anodes galvaniques sont susceptibles d'être rejetées et sont les plus directement assimilables par les organismes marins ;
- Il existe suffisamment de données disponibles (bathymétrie, courantologie, etc.) pour réaliser des scénarios de modélisation.

Comment évaluer le risque associé au rejet des substances chimiques émises par les anodes galvaniques sur les organismes marins vivants dans la colonne d'eau ?

Un modèle hydrodynamique a été développé comme première approche pour prédire la dispersion des métaux dans la colonne d'eau. Il a permis de déterminer une concentration environnementale prédite PEC pouvant être comparée avec les PNEC existantes.

La méthode d'évaluation des risques utilisée suit le cadre technique et réglementaire REACH[6] (issue de la réglementation européenne du même nom). Cette méthode caractérise le risque environnemental comme le rapport entre : (i) l'exposition d'une espèce à une substance chimique (*via* le seuil d'exposition établi par la PEC) et (ii) les effets éco-toxicologiques que cette substance va générer sur un individu, une espèce ou un groupe d'espèces (*via* le seuil de danger défini grâce à la PNEC). Ce rapport est appelé **ratio de caractérisation des risques**. Il permet d'évaluer si une substance chimique présente un risque pour l'environnement ou non (ratio < 1). Cette méthode s'articule autour de trois étapes principales, détaillées ci-après (Fig. 5) :

- Inventaire des substances chimiques (1) ;
- Définition des seuils de danger et d'exposition (2) ;
- Évaluation des risques (3).

[6] REACH, Règlement (CE) n° 1907/2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances, et instituant une agence européenne des produits chimiques. Disponible sur le site EUR-Lex (https://eur-lex.europa.eu/FR/legal-content/summary/european-chemicals-agency-echa-how-the-european-union-regulates-chemicals.html)

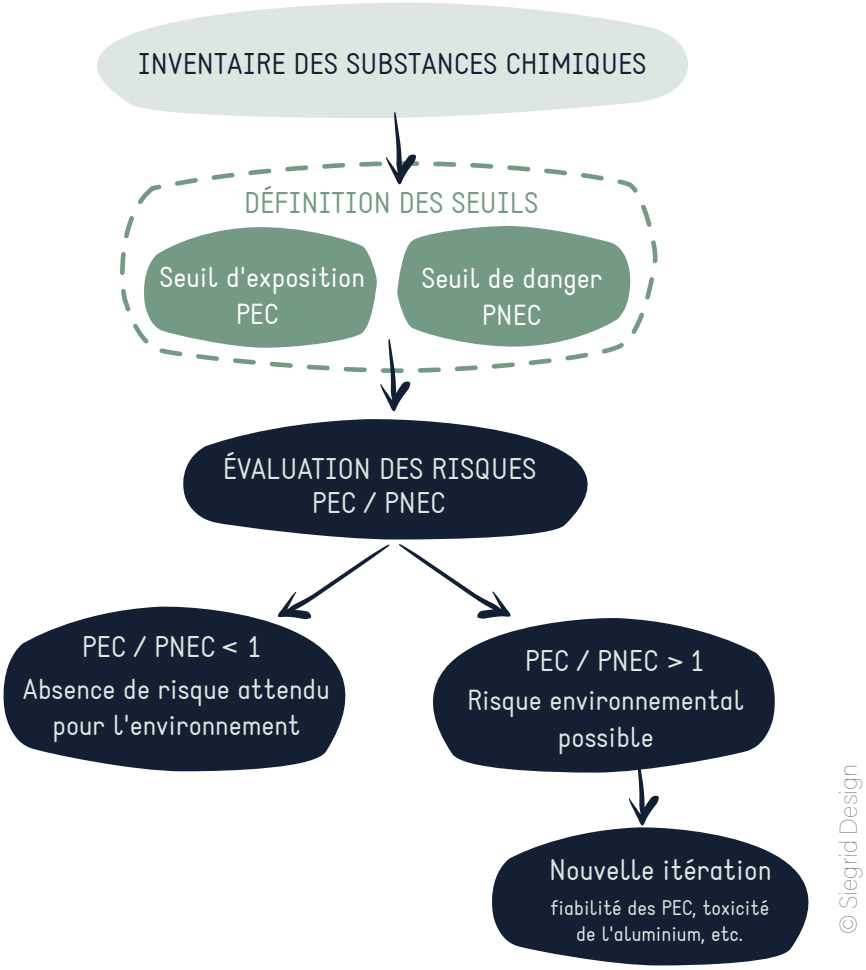


Fig. 5 *Schéma conceptuel de la méthode utilisée pour caractériser le risque environnemental associé aux éléments métalliques relargués par les anodes galvaniques.*

Quels sont les contaminants chimiques susceptibles d'être relargués par les anodes GACP ?

Pour caractériser les rejets potentiels des protections galvaniques dans le milieu marin, il est nécessaire d'identifier préalablement toutes les substances chimiques susceptibles d'être rejetées dans le milieu. L'étude de la composition des anodes galvaniques permet de réaliser un inventaire exhaustif des substances chimiques susceptibles d'être relarguées dans l'environnement marin. Aujourd'hui, les anodes galvaniques utilisées pour la protection de grandes structures immergées sont principalement composées d'aluminium et de zinc. Considérant le fonctionnement "sacrificielle" des anodes galvaniques, la liste des substances chimiques libérées par l'anode est naturellement liée à la liste des métaux qui la composent (Tab. 1).

	% de la masse totale
Aluminum (Al)	94
Zinc (Zn)	5,75
Silicium (Si)	≤ 0,12
Fer (Fe)	≤ 0,09
Indium (In)	≤ 0,040
Cuivre (Cu)	≤ 0,003
Cadmium (Cd)	≤ 0,002

Tab. 1 *Composition d'une anode galvanique en aluminium selon les informations fournies par le rapport technique DNVGL-RP-B401 qui définit les normes de composition des anodes.*

Comment ces contaminants chimiques peuvent-ils interagir avec les organismes marins vivants dans la colonne d'eau ?

Différents stades de dégradation d'une anode galvanique

Les éléments chimiques libérés par l'anode peuvent migrer sous forme « dissoute » vers les différents compartiments du milieu marin (colonne d'eau, sédiment, etc.) ou précipiter sous forme de dépôt d'oxydes qui va se former en surface des anodes. La **spéciation** de ces éléments chimiques sera contrôlée par les caractéristiques physico-chimiques du milieu. Ils pourront être présents sous différentes formes chimiques plus ou moins stables qui pourront être accumulés par les organismes marins s'ils sont sous des formes dites « biodisponibles », c'est-à-dire assimilables par les organismes marins.

Pour caractériser les risques, l'approche du « pire des cas » est considérée en première intention. Ce « pire cas » considère que l'ensemble des éléments métalliques relargués par les anodes seront présents sous forme dissoute dans le milieu, et donc susceptibles d'être assimilés par les organismes de la colonne d'eau.

Comment définir des seuils d'exposition et de danger ?

Après avoir identifié les substances chimiques d'intérêt susceptibles d'être émises dans l'environnement, il est nécessaire de collecter des informations sur le niveau d'exposition des organismes marins à ces substances et le danger que cela représente pour eux.

Le niveau d'exposition d'une substance est établi par sa valeur de **concentration prédite dans l'environnement** ou **PEC** qui peut être obtenue par des mesures de concentration *in situ* ou par modélisation pour les différents compartiments de l'environnement. La $PEC_{eau\ marine}$ caractérise le niveau d'exposition des organismes pélagiques à une substance. Dans le cas du projet ANODE, les valeurs de $PEC_{eau\ marine}$ de chaque substance ont été obtenues par modélisation. Cela permet d'étudier les capacités de dispersion des métaux dans la colonne d'eau au regard des conditions hydrodynamiques de la zone et de l'influence des fleuves et cours d'eau (dominée par la Seine sur le site de Courseulles-sur-Mer).

La caractérisation du danger d'une substance peut être définie sur la base de la **concentration prédite sans effets** ou **PNEC**. Ce seuil correspond à la concentration en dessous de laquelle des effets néfastes d'une substance ne sont pas attendus pour le compartiment environnemental considéré (la colonne d'eau dans notre cas). S'agissant de la $PNEC_{eau\ marine}$, visant la protection des espèces vivant dans la colonne d'eau, elle est déterminée à partir des résultats des tests d'écotoxicité réalisés en laboratoire sur différentes espèces. Selon la substance considérée, il n'est pas rare que la $PNEC_{eau\ marine}$ repose sur un nombre de données limité, voire ne soit pas disponible (cas du silicium par exemple).

Comment évaluer les risques environnementaux à partir des données de PEC et PNEC ?

L'évaluation des risques est réalisée grâce au ratio PEC/PNEC. Le ratio $PEC_{eau\ marine}/PNEC_{eau\ marine}$ va caractériser le risque environnemental d'une substance donnée pour les espèces pélagiques de la colonne d'eau. Lorsque ce ratio est en dessous de 1, aucun risque environnemental n'est attendu pour les individus, même les plus sensibles. En revanche, en cas de résultat supérieur à 1, la substance est considérée comme étant susceptible de présenter un risque pour l'environnement. Dans ce cas, une nouvelle itération est menée afin d'affiner l'évaluation du risque. Le scénario « pire cas » évolue vers un scénario plus « réaliste » toujours en se basant sur les données existantes. Il s'agit alors d'affiner la PEC en améliorant la précision des données et/ou la PNEC en évaluant la robustesse des valeurs utilisées.

Étude de cas : Courseulles-sur-Mer

Dans l'étude de cas menée à Courseulles-sur-Mer, **il n'a pas été mis en évidence de risques associés au relargage par les anodes du zinc, du fer, du cuivre et du cadmium pour les espèces pélagiques**. L'absence de valeur de PEC pour le silicium et l'indium n'a pas permis de caractériser le risque environnemental pour ces deux éléments.

Dans le cas de l'aluminium, l'indicateur PEC/PNEC s'est révélé supérieur à 1. Une deuxième itération visant à mieux caractériser le risque a donc été menée. Celle-ci a permis (1) d'affiner la $PEC_{eau\ marine}$, en tenant compte de la dispersion du panache de la Seine sur le site de Courseulles-sur-Mer, (2) d'étudier la robustesse de la $PNEC_{eau\ marine}$ et (3) de rechercher des résultats d'essais éco-toxicologiques en vue d'affiner cette $PNEC_{eau\ marine}$. Cette démarche conduite sur la base des résultats existants n'a pas permis d'écarter le risque en lien avec le rejet d'aluminium. Une dernière itération est nécessaire avant de pouvoir statuer. Elle nécessite à la fois (i) de mieux caractériser la concentration initiale dans le milieu par des mesures *in situ* et (ii) d'acquérir des données complémentaires en vue d'affiner la $PNEC_{eau\ marine}$.

Recommandations

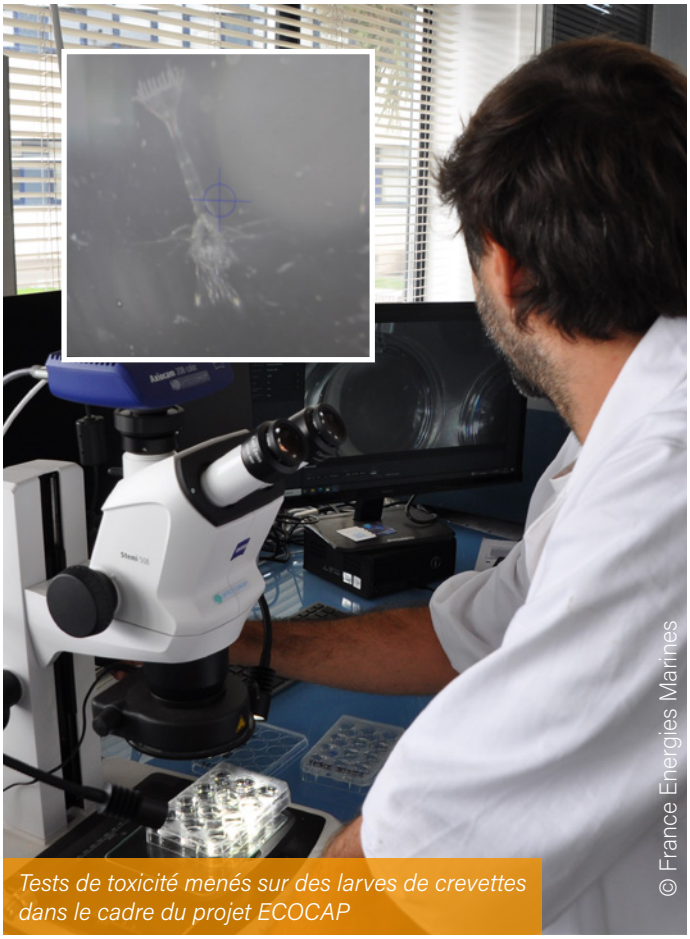
D'une manière générale, l'ensemble des experts mobilisés mettent en avant les lacunes de connaissances, notamment sur les concentrations initiales de métaux dans le milieu marin et sur les seuils de toxicité de certaines substances et, en particulier, de l'aluminium. Pour combler ces lacunes, plusieurs recommandations, notamment issues du rapport ANODE, sont proposées ici :

- Définir un état de référence par site afin de connaître (i) les niveaux de concentration initiaux en éléments métalliques (mesures *in situ*) et (ii) les conditions hydrodynamiques afin d'établir la capacité de dispersion des substances ;
- Améliorer les connaissances sur les formes chimiques dissoutes et assimilables des éléments métalliques (spéciation) relargués par les anodes et réaliser des essais éco-toxicologiques sur des espèces marines afin d'affiner la $PNEC_{eau\ marine}$ de l'aluminium ;
- Affiner les valeurs de PNEC et de PEC de l'eau de mer en s'assurant que les deux valeurs soient comparables (même compartiment) ;
- Conduire une évaluation sur le compartiment sédimentaire pour compléter la démarche d'évaluation des risques.

Le développement des parcs éoliens en mer à l'échelle des façades maritimes françaises, peut être associé à la mise en œuvre de projets de recherche et de suivis à long terme afin d'améliorer les connaissances sur les concentrations et les risques environnementaux associés à l'utilisation d'anodes galvaniques.

Perspectives

Dans la continuité des travaux menés dans le cadre du projet ANODE, le projet ECOCAP[7] initié en 2021 a pour principal objectif d'approfondir les connaissances sur les potentiels impacts environnementaux des systèmes de protection contre la corrosion en s'intéressant aux GACP, ICCP et peintures anti-corrosion. Suivant les recommandations du projet ANODE, le projet se penchera, entre autres, sur l'amélioration du seuil de toxicité de l'aluminium avec pour ambition de conclure sur le risque associé à l'aluminium dans la colonne d'eau. Le projet POLLUECUME[8] s'intéressera à une première approche d'évaluation des risques chimiques pour le compartiment sédimentaire.



Tests de toxicité menés sur des larves de crevettes dans le cadre du projet ECOCAP

[7] ECOCAP, Analyse éco-toxicologique des protections cathodiques pour évaluer le risque chimique des éléments libérés par les anodes galvaniques et le courant imposé sur le milieu marin et ses réseaux trophiques. Projet de 36 mois (2021-2024). Informations complémentaires disponibles sur le site de France Énergies Marines : https://www.france-energies-marines.org/projets/ecocap/

[8] POLLUECUME, Etude des effets de la pollution des composés spécifiques aux anodes sacrificielles et aux protections par courant imposé sur les fonds marins. Projet mené par le GT ECUME. Informations complémentaires disponibles sur le site du Ministère en charge de la transition énergetique : https://www.eoliennesenmer.fr/observatoire/ecume

Conclusion

Il existe une **bonne connaissance du fonctionnement des anodes galvaniques qui sont utilisées depuis très longtemps dans les domaines de l'industrie et du trafic maritime**. En revanche, les préoccupations environnementales relatives à l'usage de ces systèmes de protection sont relativement récentes et se focalisent notamment sur le développement des parcs éoliens. En combinant expertise écotoxicologique et modélisation hydrodynamique, **le projet ANODE a permis de déterminer qu'il n'y a pas de risque associé à la plupart des éléments composant les anodes galvaniques, à savoir le zinc, le fer, le cuivre et le cadmium**. En revanche, **des expérimentations complémentaires pour l'aluminium sont nécessaires** au regard des concentrations prédites sans effet (PNEC) actuellement disponibles et qui ne semblent pas adaptées à ce type d'évaluation. Il est donc nécessaire d'affiner ces mesures et de considérer les données issues de mesures *in situ* afin de pouvoir estimer les risques associés aux relargages d'aluminium.

EN BREF

La corrosion est un phénomène naturel bien connu qui résulte de l'interaction entre un métal et son environnement. Les systèmes de protection par anodes cathodiques, utilisés au sein des parcs éoliens en mer, sont utilisés depuis longtemps par d'autres secteurs d'activités maritimes (transport maritime, balisage, gestion portuaire, etc.). Deux types d'anodes peuvent être utilisées : les anodes à courant imposés (dites ICCP) et les anodes sacrificielles ou galvaniques (dites GACP). Portant sur la caractérisation des risques associés aux contaminants chimiques susceptibles d'être relargués par les anodes sacrificielles à base d'aluminium, le projet ANODE a pu démontrer une absence de risque pour plusieurs composants : zinc, cuivre, fer, cadmium. Il n'a pas pu apporter de conclusion sur l'aluminium. Un des objectifs du projet ECOCAP (2021-2024) est de pallier ce manque en apportant des réponses sur le risque chimique associé à la présence d'aluminium dans la colonne d'eau.

En savoir plus

Rendez-vous sur la chaine Youtube de France Energies Marines pour consulter les résultats du projet ANODE :

Bibliographie

Creus J., Sabot R., Refait P., (2019). Corrosion et protection des métaux en milieu marin. In Techniques de l'ingénieur. COR620 v1, 17 p.

Degraer S., Brabant R., Rumes B., Vigin L., (eds)., (2019). Environmental Impacts of Offshore Wind Farms in the Belgian Part of the North Sea: Marking a Decade of Monitoring, Research and Innovation. Brussels: Royal Belgian Institute of Natural Sciences, OD Natural Environment, Marine Ecology and Management, 134 p.

Kirchgeog T., Weinberg I., Hörning M., Baier R., Schmid M.J., Brockmeyer B., (2018). Emissions from corrosion protection systems of offshore wind farms: Evaluation of the potential impact on the marine environment. In Marine Pollution Bulletin 136, pp. 257-268. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.058

Landolt D., (2003). Corrosion et chimie de surfaces des métaux. In traité des matériaux. Presses polytechniques et universitaires romandes, pp 1-9

Michelet N., Julian N., Duarte R., Burgeot T., Amouroux I., Dallet M., Caplat C., Gonzalez J.-L., Garreau P., Aragon E., Perrin F.-X., Safi G., (2020). Recommendations for the quantitative assessment of metal inputs in the marine environment from the galvanic anodes of offshore renewable energy structures. France Energies Marines Ed., 34 p.

Parant, L., (2012). La corrosion, un fléau pour les navires. Dossier technologies. In Production maintenance, pp. 25-28

Roche M., (2015). L'essentiel sur la protection cathodique. In CEFRACOR, 14 p

Tous droits réservés.
Les textes de ce bulletin sont la propriété de France Energies Marines.
Ils ne peuvent être reproduits ou utilisés sans citer la source et sans autorisation préalable. Les photos, les schémas et les tableaux (sauf indication contraire) sont protégés par le droit d'auteur.
Ils restent la propriété de France Energies Marines et ne peuvent être reproduits sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit, sans l'autorisation écrite préalable de France Energies Marines.

Citer le document comme ci-dessous :
Henry S., Amouroux I., Aragon E., Caplat C., Gonzalez J.-L., Michelet N. et Safi G.
Les métaux relargués par les anodes sacrificielles des parcs éoliens en mer présentent-ils un risque pour l'écosystème marin ?
Bulletin COME3T n°08
Plouzané : France Energies Marines, 2023, 20 pages.
Edition : juin 2023

Dépôt légal à parution.
Maquettage : France Energies Marines
Conception graphique des figures : Siegrid Design

COME3T est une initiative qui réunit un ensemble d'acteurs nationaux et régionaux (universités, industriels, bureaux d'études, régions, services de l'État, etc.) au sein d'un comité de pilotage qui soumet des questions, issues des interrogations du public et des principaux enjeux environnementaux et socio-économiques identifiés par les acteurs, à des comités d'experts neutres et indépendants. Pour chaque thématique, un comité d'experts est constitué suite à un appel à candidature et apporte des éléments d'information, de synthèse et de recommandation sur les enjeux environnementaux et socio-économiques des énergies marines renouvelables.

https://www.france-energies-marines.org/projets/come3t/

Une initiative coordonnée par France Energies Marines.

France Energies Marines est l'Institut pour la Transition Énergétique dédié aux énergies marines renouvelables. Ses missions : fournir, valoriser et alimenter l'environnement scientifique et technique nécessaire pour lever les verrous liés au développement des technologies des EMR tout en assurant une intégration environnementale optimale. De par son fonctionnement reposant sur un partenariat public-privé, l'Institut se situe à l'interface entre les acteurs institutionnels (collectivités territoriales, régions, etc.), académiques, scientifiques et industriels (développeurs et porteurs de projet).

Bâtiment Cap Océan
Technopôle Brest Iroise
525, Avenue Alexis De Rochon
29280 Plouzané
02 98 49 98 69
www.france-energies-marines.org

ISSN 2743-6896

© France Energies Marines - 2023