

Les éoliennes offshore, contre vents et corrosion

Ce sujet suscite un grand intérêt chez moi puisque j'ai d'abord un lien très personnel avec la mer. J'habite effectivement à Saint-Nazaire, proche du premier parc éolien offshore de France. De plus, les énergies renouvelables m'intéressent, pour leur importance dans la lutte contre le changement climatique, et leur future évolution.

Le sujet aborde la transition énergétique par les énergies renouvelables, mais aussi la conversion de l'énergie cinétique en énergie mécanique puis électrique par les éoliennes. Enfin, il s'inscrit dans la transformation technologique, par de nouvelles conceptions d'éoliennes, augmentant leur durabilité, efficacité, rentabilité, et par de nouveaux matériaux anticorrosion utilisés.

Ce TIPE fait l'objet d'un travail de groupe.

Liste des membres du groupe :

- *MARCHAND Matis*

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *CHIMIE (Chimie Inorganique)*

- *CHIMIE (Chimie Théorique - Générale)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français) Mots-clés (en anglais)

Eolienne offshore *Offshore wind turbine*

Acier *Steel*

Anode sacrificielle *Sacrificial anode*

Rouille *Rust*

Réaction d'oxydo-réduction *Redox reaction*

Bibliographie commentée

La corrosion est le résultat d'une réaction hétérogène d'un réactif liquide ou gazeux sur un métal solide, comme la rouille du fer exposé à l'air humide [1]. Sa prévention est difficile, et devint un problème majeur en détruisant les métaux [2]. 20% de la production annuelle d'acier est dédiée à la contrer [1], et son coût en France est estimé entre 1 et 5 % du PIB [3].

Son étude commence avec la théorie électrochimique en 1830 de De La Rive, mais ne fit de réelles avancées qu'à partir du 20ème siècle avec les français Guillet, Portevin et Chaudron. En outre, Cazaud découvrit la forte résistance du zinc à la corrosion [2].

Cette dernière affecte également les éoliennes, notamment offshore.

Elles sont constituées d'un mât en acier installé sur une fondation ou sur une base flottante, fixées au fond marin [4], d'une nacelle et de pales. Ces dernières sont en matériaux composites à base de fibres de verre imprégnées de résines polyester ou d'époxy, et de fibres de carbone aux zones fortement sollicitées [5]. Les fondations monopieux sont constituées d'un pieu métallique enfoncé dans le fond marin, comme le parc de Saint-Nazaire [4].

Le mât et la fondation métallique sont donc les plus corrodables, notamment la "zone d'éclaboussures", exposée périodiquement à l'eau de mer par les marées et les vagues, la "zone atmosphérique" soumise à l'air marin, et la zone immergée incluant le système d'ancrage [6].

La rouille entraîne des défaillances structurelles, les structures étant régulièrement confrontées à des températures extrêmes, au sel, acides et dioxygène dissous, et aux dommages des revêtements par les marées [6].

Les éoliennes subissent principalement une corrosion uniforme, se développant à la même vitesse en tout point du métal. Plus localisée, la corrosion par piqûres se produit aussi, provenant d'une discontinuité dans la couche protectrice du métal [6] [1].

Cette corrosion « électrochimique » apparaît d'abord à la surface de l'éolienne. Elle est causée par des hétérogénéités dans le métal ou dans le liquide/gaz : une goutte d'eau salée sur l'acier est plus oxygénée aux bords qu'au centre, où le métal, de potentiel plus négatif, devient l'anode et rouille [3].

Finalement, pour protéger l'éolienne on peut :

- choisir un métal/alliage peu corrodable comme l'acier inoxydable : peu utilisé pour son coût élevé ;
- revêtir d'une peinture isolante, ou d'un métal/alliage résistant bien au milieu corrosif, comme du zinc, chrome... ;
- coupler l'acier avec une anode sacrificielle moins noble et de potentiel inférieur, qui se corrode à sa place, en le remplaçant comme anode [1] [3]. Généralement en zinc, aluminium, magnésium voire alliage, elles sont rentables, faciles à installer et augmentent bien la longévité des infrastructures [3] ;
- imposer au mât un potentiel suffisamment négatif via un courant imposé, lui évitant d'être attaqué : un peu plus cher que l'anode mais plus écologique.

Les éoliennes sont généralement protégées par application d'une protection cathodique et de revêtements [7], qui ne sont malheureusement pas parfaitement efficaces pour des durées très longues [6]. La maintenance des parcs est réalisée pendant toute leur durée de vie, de 25 à 30 ans [4] [1]. Le premier parc offshore, à Vindeby au Danemark, a été exploité pendant 26 ans [4].

Jusqu'en 2015, aucune protection anticorrosion interne n'était prévue, les fondations monopieux étant supposées étanches à l'eau et à l'air. En réalité, elles en ont besoin car pouvant subir des infiltrations par des trappes laissées ouvertes ou par des joints d'ouvertures de câbles [7].

Pour les futurs parcs de Fécamp et Saint-Brieuc, les rejets annuels de métaux sont estimés à 64 tonnes, soit une tonne par éolienne. Leur impact environnemental n'est pas parfaitement connu, mais selon une étude de l'IFREMER, ils ne semblent pas entraîner une surconcentration de métaux dans le milieu environnant [8].

La corrosion contraint donc les ingénieurs à innover et chercher un équilibre entre longévité et rendement accrus des éoliennes, coûts des protections, et potentielles pollutions environnementales.

Problématique retenue

Comment combattre efficacement la corrosion de l'acier et augmenter la durée de vie des mâts d'éoliennes offshore ?

Objectifs du TIPE du candidat

Mon objectif est de trouver les meilleurs moyens de contrer la corrosion en prenant en compte leurs conséquences. Je compte donc :

- Modéliser par des programmes, la vitesse de la corrosion sur les métaux en fonction de facteurs cinétiques ;
- Etudier l'impact de la corrosion en fonction du matériau ;
- Montrer les différences de vulnérabilité en fonction de la partie métallique étudiée ;
- Souligner l'intérêt de protections ;
- Vérifier la pertinence des réactifs utilisés ;
- Modéliser la pollution des métaux sur un parc éolien, et comparer avec celle obtenu expérimentalement ;
- Conclure sur le choix optimal avec une étude économique.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] GÉRARD BERANGER ET JEAN TALBOT : CORROSION [en ligne]. In Encyclopædia Universalis. : <https://www-universalis-edu-com.budistant.univ-nantes.fr/encyclopedia/corrosion/>
- [2] ANDRÉ HACHE : La Corrosion des métaux (3ème édition PUF) : <https://excerpts.numilog.com/books/9782705941611.pdf>
- [3] ADRIEN WAQUET : La corrosion des aciers : <https://www-techniques-ingenieur-fr.budistant.univ-nantes.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/techniques-du-batiment-connaître-les-matériaux-de-la-construction-43804210/la-corrosion-des-aciers-tba1054/>
- [4] RTE (RÉSEAU DE TRANSPORT D'ÉLECTRICITÉ) : Quelles sont les grandes caractéristiques d'un parc éolien en mer posé ? PROJET ÉOLIEN EN MER EN SUD-ATLANTIQUE Débat public – Dossier du maître d'ouvrage : https://www.eoliennesenmer.fr/sites/eoliennesenmer/files/fichiers/2021/09/2021-09_Eolien_mer_Sud_Atlantique_DMO_Fiche09.pdf
- [5] MARC RAPIN : Éoliennes - Évolution, principes de base et potentiel de conversion : <https://www-techniques-ingenieur-fr.budistant.univ-nantes.fr/base-documentaire/energies-th4/energies-renouvelables-intermittentes-42594210/eoliennes-bm4640/contexte-actuel-bm4640v4niv10001.html>
- [6] OFFICE DES PUBLICATIONS DE L'UNION EUROPÉENNE : Pourquoi les éoliennes offshore ne rouillent-elles pas ? : <https://cordis.europa.eu/article/id/444371-why-don-t-offshore-wind-turbines-get-rusty/fr>
- [7] ÉDITIONS TI : La corrosion : un défi pour une société durable : <https://www-techniques-ingenieur-fr.budistant.univ-nantes.fr/base-documentaire/matériaux-th11/methodes-de-prevention-et-lutte-contre-la-corrosion-42374210/la-corrosion-un-defi-pour-une-societe-durable-cor2000/>
- [8] HUGO LARA : Les éoliennes en mer polluent-elles à cause des anodes sacrificielles ? : <https://www.revolution-energetique.com/les-eoliennes-en-mer-polluent-elles-a-cause-des-anodes-sacrificielles/>

DOT

- [1] : 13 Mars 2024 : choix définitif du sujet de la corrosion des mâts d'éoliennes offshore
- [2] : 12 Mai 2024 : entretien avec Franck Schoefs : transmission d'informations et conseils
- [3] : 15 Mai 2024 : collecte des matériaux pour l'expérience personnelle
- [4] : 24 Mai 2024 : entretien avec Romain Clerc : conseils pour expériences et renseignements sur fonctionnement des chambres à brouillard salin
- [5] : 28 Juillet 2024 : début de l'expérience personnelle
- [6] : 27 Septembre 2024 : réunion avec Laurence Guiheneuf à l'IUT de Saint Nazaire pour planifier une expérience
- [7] : 02 Décembre 2024 : début de l'expérience à l'IUT de Saint-Nazaire

[8] : 12-18 Mai 2025 : écriture du programme python des courbes, étude de pollution et étude économique