



BLAISE PASCAL
PT 2023-2024

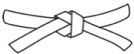
DM 14 – à rendre lundi 12 février

Corrosion

Travailler avec vos cours et TD ouverts est **chaudement recommandé** : un DM est un entraînement, pas une évaluation. Réfléchir ensemble est une bonne idée, mais le travail de rédaction doit être individuel. En cas de besoin, **n'hésitez pas à me poser des questions**, à la fin d'un cours, par mail ou via l'ENT.



Flasher ce code pour
accéder au corrigé

Ceinture		Travail à réaliser
	Ceinture blanche	Questions 1 à 5
	Ceinture jaune	Questions 1 à 10
	Ceinture rouge	En entier
	Ceinture noire	En entier

Protection contre la corrosion des éoliennes off-shore

L'objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050 pris par la France impose une augmentation de la consommation électrique décarbonée pour remplacer les énergies fossiles, et donc un développement massif des énergies renouvelables. Parmi celles-ci figure l'éolien off-shore, c'est-à-dire en pleine mer, auquel se prête bien la géographie française : la France a pour objectif 50 parcs en service à l'horizon 2050 pour une puissance totale installée de 40 GW.

Ainsi, la Seine-Maritime comptera d'ici peu deux parcs éoliens off-shore : le premier, au large de Fécamp, sera mis en service courant 2024 et le deuxième, au large de Dieppe et du Tréport, le sera en 2026. À eux deux, ces parcs devraient produire annuellement l'équivalent de 15 % de la consommation électrique normande.

Du point de vue de la corrosion, les fondations des éoliennes constituent un point sensible. S'agissant de structures métalliques immergées, les implanter en milieu marin exige de mettre en œuvre un dispositif de protection efficace. Ces fondations pèsent environ 650 tonnes, et ont une structure en treillis appelée *jacket*, représentée figure 1. La solution technique retenue pour le parc de Fécamp repose sur l'utilisation d'anodes sacrificielles en aluminium, alors que le parc de Dieppe utilisera une méthode dite « par courant imposé ». L'objectif de cet exercice est d'étudier ces deux méthodes permettant de se prémunir contre la corrosion.

A - Diagramme de corrosion du fer

Pour une première approche très simplifiée, les propriétés de l'acier inoxydable formant les éoliennes vis-à-vis de la corrosion peuvent être approximées par celle du fer. La figure 2 représente le diagramme de corrosion du fer, restreint aux espèces Fe , Fe^{2+} , Fe^{3+} et $\text{Fe}_2\text{O}_{3(s)}$, pour une concentration de tracé $c = 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

- 1 - Attribuer les quatre domaines du diagramme. La réponse doit être justifiée.
- 2 - Déterminer le potentiel standard du couple Fe^{2+}/Fe .
- 3 - Déterminer la pente de la frontière séparant les domaines ② et ④.
- 4 - Déterminer la constante d'équilibre de la réaction de dissociation de Fe_2O_3 en Fe^{3+} en milieu acide.
- 5 - Le pH de l'eau de mer est de l'ordre de 8. Sous quelles formes (= quelles espèces chimiques) le fer métallique peut-il s'oxyder au contact du dioxygène dissous dans l'eau de mer ? En considérant l'espèce de nombre d'oxydation le plus élevé, écrire l'équation de la réaction correspondante.

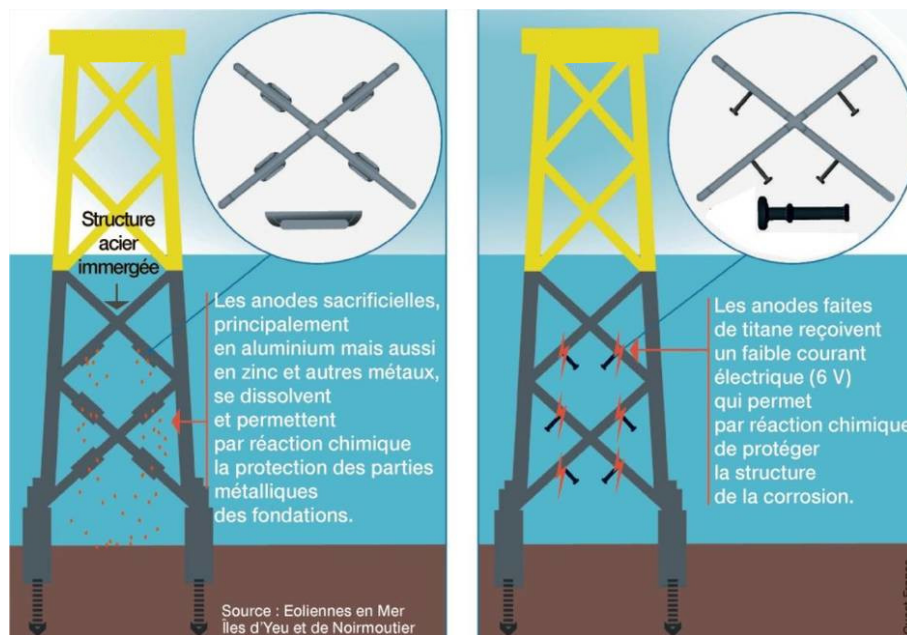


Figure 1 – Schéma de principe des méthodes de protection. Figure extraite du journal *Ouest France* ... qui ne distingue visiblement pas intensité et tension, pas plus qu'anode et cathode ☹

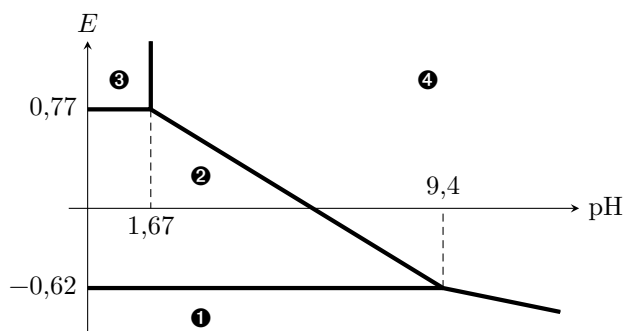


Figure 2 – Diagramme de corrosion du fer. Diagramme construit pour une concentration de trace $c = 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$.

B - Protection par des anodes sacrificielles en aluminium

Les éoliennes du parc de Fécamp seront protégées par des anodes sacrificielles en aluminium fixées à l'acier de leurs fondations. Pour interpréter le phénomène de protection, raisonnons sur le diagramme intensité-potentiel qualitatif représenté figure 3, où sont représentées la courbe d'oxydation de Al, celle de Fe, et la courbe de réduction de O_2 . **Les échelles ne sont pas respectées.**

6 - Justifier que l'existence de dioxygène dissous dans l'eau se traduit par la présence d'un palier de diffusion cathodique sur la courbe intensité-potentiel de l'eau.

7 - On donne $E_{\text{Al}^{3+}/\text{Al}}^\circ = -1,66 \text{ V}$, et on suppose les concentrations en cations du même ordre de grandeur. Attribuer les courbes (a) et (b) au fer et à l'aluminium en justifiant.

8 - Indiquer sur le diagramme le potentiel de corrosion E_1 et le courant de corrosion i_1 dans l'hypothèse où seul l'aluminium serait oxydé, et de même pour E_2 et i_2 dans l'hypothèse où seul le fer serait oxydé. **N'oubliez pas de rendre l'énoncé avec votre copie !**

9 - Si le potentiel du système était réellement E_2 , que vaudrait le courant de corrosion de l'aluminium ? Sachant que le courant total est la somme des courants produits par les différentes réactions électrochimiques¹, justifier que cela invalide l'hypothèse d'une oxydation du fer.

10 - En conclusion de cette étude, c'est donc l'anode en aluminium qui est corrodée, alors que la fondation en acier de l'éolienne est protégée. Écrire l'équation de la réaction correspondante.

1. Facile à comprendre si on pense en termes d'électrons produits : tous les électrons produits par toutes les réactions s'ajoutent, donc les courants aussi.

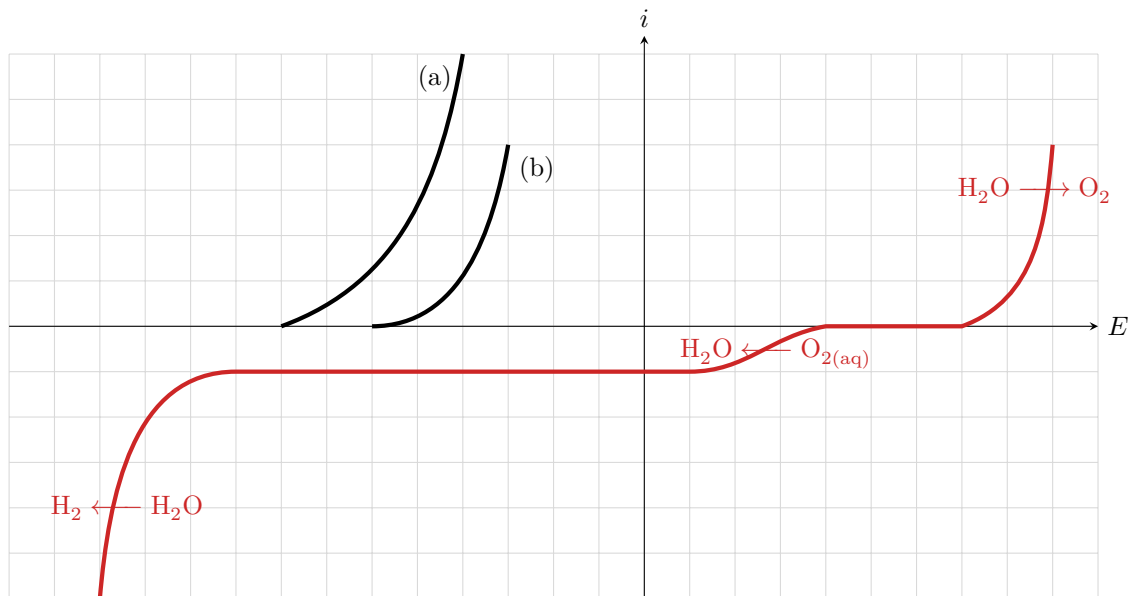


Figure 3 – Diagramme courant-potentiel qualitatif.

11 - En raisonnant notamment sur la demi-équation électronique d'oxydation, montrer que la corrosion d'une masse m d'aluminium libère une charge électrique valant, en valeur absolue,

$$q = \frac{3m\mathcal{F}}{M_{\text{Al}}} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \mathcal{F} = \mathcal{N}_A e = 9,65 \cdot 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1} & (\text{constante de Faraday}) \\ M_{\text{Al}} = 27 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} \end{cases}$$

12 - Une fois l'anode installée, le courant de corrosion total est de l'ordre de 400 A par éolienne (non, il n'y a pas d'erreur de puissance de dix! ☺). En déduire la masse d'aluminium relâchée chaque année par le parc éolien de Fécamp, qui compte 71 éoliennes. Commenter.

C - Protection cathodique par courant imposé

Pour éviter le rejet de métaux dans l'environnement, le parc de Dieppe utilisera une méthode de protection alternative, dite par courant imposé. Cette méthode consiste à fixer à la fondation d'éolienne des électrodes en titane, reliées à un générateur, dont le deuxième pôle est relié à une autre électrode inerte. En imposant un courant adéquat au travers du système, l'électrode en titane et l'éolienne avec laquelle elle est en contact agissent exclusivement en cathode, si bien que l'éolienne est protégée contre la corrosion. En pratique, il y a toujours réduction du dioxygène dissous à la surface de la fondation de l'éolienne, mais les électrons sont apportés par le générateur externe et non plus par l'oxydation du fer. Au niveau de l'anode inerte, ce sont les ions chlorure présents dans l'eau de mer qui sont oxydés en dichlore Cl_2 .

13 - Écrire l'équation de la réaction qui a lieu au sein du système.

14 - Faire un schéma de principe du dispositif, représentant la fondation d'éolienne, le générateur et l'anode inerte. Indiquer sur ce schéma le sens de déplacement des électrons et le sens réel du courant au travers du système en justifiant. Schématiser par des flèches courbes les réactions électrochimiques ayant lieu sur chaque partie du système.

15 - Pour que la protection soit efficace, vingt cathodes en titane montées en parallèle seront utilisées par éolienne, chaque cathode étant traversée par un courant de 2,5 A et soumise à une tension de 6 V. Quelle puissance est nécessaire au système de protection ?

Pour estimer l'impact du système de protection sur le rendement du parc, comparons l'énergie consommée pour la protection anti-corrosion à celle produite par l'éolienne. Les éoliennes du parc de Dieppe auront une puissance nominale de 8 MW, mais en raison des fluctuations de vent elles ne fonctionneront pas tout le temps à pleine puissance. Cet effet est quantifié par le *facteur de charge*, de l'ordre de 40 % pour l'éolien off-shore : l'énergie fournie par l'éolienne est la même que si elle fonctionnait à pleine puissance 40 % du temps, et pas du tout autrement.

16 - Calculer l'énergie fournie par l'éolienne en un an, et l'énergie consommée pour la protéger. Conclure.