



BLAISE PASCAL
PT 2023-2024

DM 14 – à rendre lundi 12 février

Correction

Corrosion

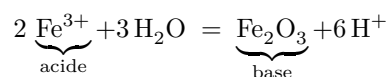
Protection contre la corrosion des éoliennes off-shore

A - Diagramme de corrosion du fer

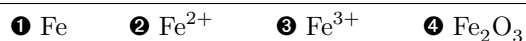
1 • **Classement redox** : Le nombre d'oxydation du fer vaut 0 dans Fe, +II dans Fe^{2+} et +III dans Fe^{3+} . Pour l'oxyde de fer,

$$2 \text{NO}_{\text{Fe}} + 3 \times (-2) = 0 \quad \text{d'où} \quad \text{NO}_{\text{Fe}} = +\text{III}.$$

• **Classement acido-basique** : le seul couple acido-basique est au NO +III, pour lequel on a



• **Conclusion** : on en déduit directement



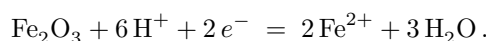
2 Raisonnons sur la frontière entre Fe^{2+} et Fe. D'après la loi de Nernst,

$$E_{\text{N}} = E_{\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}}^{\circ} + \frac{0,06}{2} \log \frac{[\text{Fe}^{2+}]}{1} \quad \text{donc} \quad E_{\text{fr}} = E_{\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}}^{\circ} + 0,03 \log c$$

d'où on déduit

$$E_{\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}}^{\circ} = E_{\text{fr}} - 0,03 \log c = -0,62 + 0,18 = -0,44 \text{ V}.$$

3 Cette frontière concerne le couple redox $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}^{2+}$, dont la demi-équation s'écrit



La loi de Nernst associée s'écrit

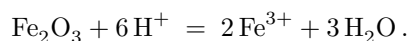
$$E_{\text{N}} = E_{\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}}^{\circ} + \frac{0,06}{2} \log \frac{[\text{H}^+]^6}{[\text{Fe}^{2+}]}$$

Ainsi, sur la frontière,

$$E_{\text{fr}} = E_{\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}}^{\circ} - \frac{0,06}{2} \log c + \frac{0,06}{2} \times 6 \log [\text{H}^+] = \left(E_{\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}}^{\circ} - 0,18 \right) - 0,18 \text{ pH}.$$

La pente de la frontière est donc de **-0,18 V par unité de pH**.

4 L'équation de la réaction est l'inverse de celle écrite question 1,



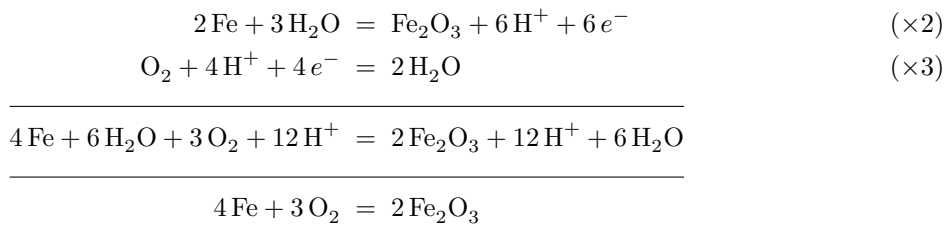
D'après la loi d'action des masses, lorsque l'équilibre est atteint,

$$\frac{[\text{Fe}^{3+}]^2 \times 1^3}{1 \times [\text{H}^+]^6} = K^{\circ}$$

et en utilisant les valeurs à la frontière entre les domaines 3 et 4, $[\text{Fe}^{3+}]_{\text{fr}} = c = 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ et $\text{pH}_{\text{fr}} = 1,67$, on obtient

$$K^{\circ} = \frac{10^{-2 \times 6}}{10^{-6 \times 1,67}} = 10^{-2}.$$

5 À pH 8, le fer peut s'oxyder ou bien sous forme de Fe^{2+} , ou bien de Fe_2O_3 . En prenant en compte uniquement Fe_2O_3 , l'équation de la réaction de corrosion s'écrit



B - Protection par des anodes sacrificielles en aluminium

6 Le dioxygène dissous est un **soluté**, d'où la présence d'un palier de diffusion sur la courbe cathodique du couple dont il est l'oxydante.

7 Le potentiel standard du couple Al^{3+}/Al est nettement inférieur à celui du couple Fe^{2+}/Fe déterminé dans la partie précédente. L'écart est tel que l'ordre sera préservé pour les potentiels de Nernst car les concentrations des cations sont du même ordre de grandeur. Ainsi, la courbe (a) est celle de l'oxydation de Al en Al^{3+} et la courbe (b) celle de l'oxydation de Fe en Fe^{2+} .

8 Voir figure 1. Le courant de corrosion est contraint par le palier de diffusion du dioxygène dissous, il est donc le même que ce soit l'aluminium ou le fer qui soit corrodé.

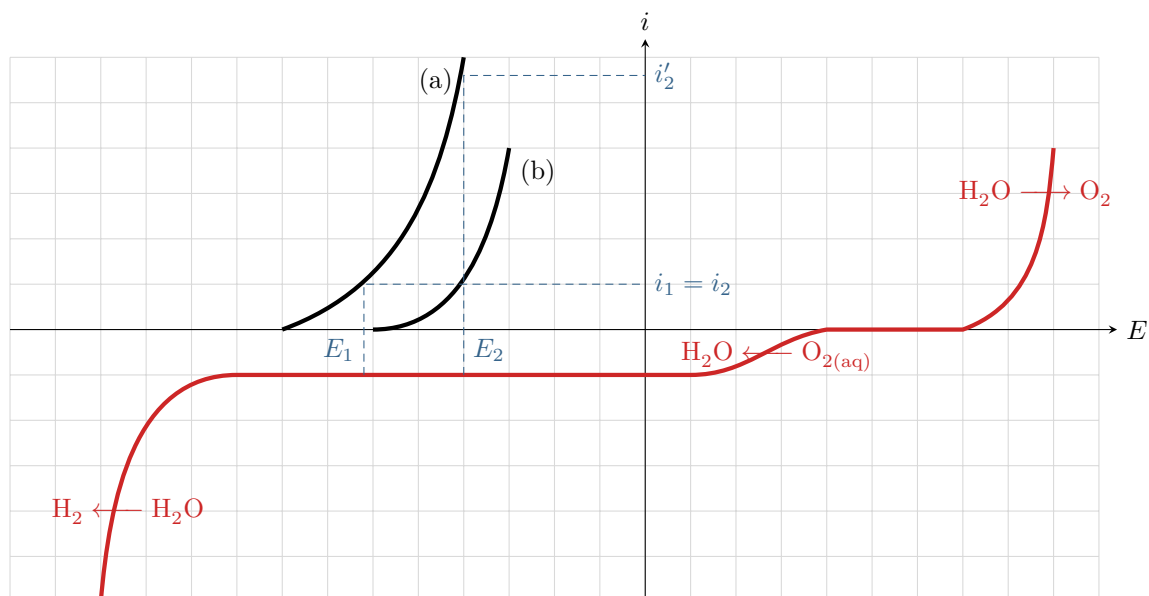
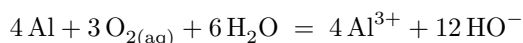
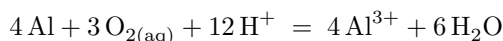


Figure 1 – Diagramme courant-potential annoté.

9 Si le potentiel du système était égal à E_2 , alors le fer serait corrodé avec le courant i_2 et l'aluminium avec le courant i'_2 représenté sur la figure 1. Le courant total d'oxydation à ce potentiel vaudrait alors $i_2 + i'_2$... ce qui ne peut pas être égal au courant cathodique $-i_1$ du palier de diffusion du dioxygène. L'hypothèse d'un système au potentiel E_2 est donc forcément fausse.

Remarquons à l'inverse que si le potentiel réel du système est E_1 alors le courant de corrosion du fer est nul. Le courant total anodique est donc simplement i_1 , ce qui permet de préserver l'égalité en valeur absolue des courants anodique et cathodique. C'est donc cette hypothèse qui est la bonne.

10 L'équation s'écrit



11 L'équation d'oxydation de l'aluminium montre que la corrosion de n mol d'aluminium solide libère $3n$ mol d'électrons. Chaque électron ayant une charge e (en valeur absolue!), et puisqu'il y a $\mathcal{N}_A$ électrons par mol, on en déduit que la charge électrique libérée par la corrosion d'une masse m d'aluminium vaut

$$q = 3n \times \mathcal{N}_A e = 3 \frac{m}{M_{\text{Al}}} \mathcal{N}_A e \quad \text{soit} \quad q = \frac{3m\mathcal{F}}{M_{\text{Al}}}.$$

12 Un courant I pendant une durée Δt correspond à une charge échangée

$$q = I \Delta t.$$

Ainsi, par identification des deux expressions, on en déduit la masse d'aluminium corrodée, et donc relâchée dans l'environnement, par la totalité des éoliennes du parc :

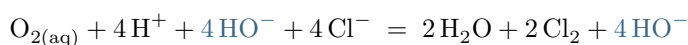
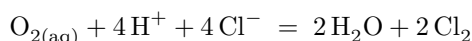
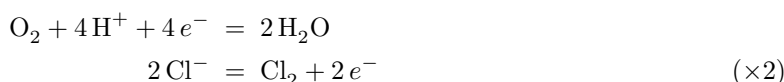
$$m = 71 \times \frac{M_{\text{Al}} I \Delta t}{3\mathcal{F}} = 83 \text{ tonnes}$$

avec $\Delta t = 1 \text{ an} = 365 \times 24 \times 3600 = 3,15 \cdot 10^7 \text{ s}$. Il s'agit d'une masse considérable, qui justifie de s'interroger sur sa toxicité pour l'environnement.

Ce dilemme est un classique de la transition écologique : ce qui est bon pour le climat au niveau global (plus de renouvelables entraîne moins d'émissions de gaz à effet de serre) ne l'est pas forcément au niveau local, que ce soit pour les habitants, pour la biodiversité, ou pour l'esthétique des paysages.

C - Protection cathodique par courant imposé

13 Il y a réduction du dioxygène et oxydation du chlore, ce qui donne



14 Voir figure 2. Pour qu'il y ait bien réduction au niveau de la fondation de l'éolienne, il faut qu'il y une arrivée d'électrons, et donc que le sens réel du courant soit sortant de l'éolienne.

15 Chaque cathode consomme une puissance de $6 \times 2,5 = 15 \text{ W}$, soit au total 300 W pour protéger une éolienne.

Cette puissance est de l'ordre de celle consommée par un petit réfrigérateur : on se rend compte dès cette question qu'elle est tout à fait raisonnable à l'échelle d'une éolienne !

16 Raisonnons sur $\Delta t = 1 \text{ an} \simeq 3 \cdot 10^7 \text{ s}$. L'énergie électrique fournie par éolienne vaut alors

$$W_{\text{fourni}} = 0,4 \times 8 \cdot 10^6 \times 3 \cdot 10^7 = 9 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

et l'énergie consommée pour la protéger est

$$W_{\text{prot}} = 300 \times 3 \cdot 10^7 = 9 \cdot 10^9 \text{ J}.$$

Ainsi, l'énergie consommée pour la protection ne représente que $0,01 \%$ de l'énergie totale fournie par l'éolienne.

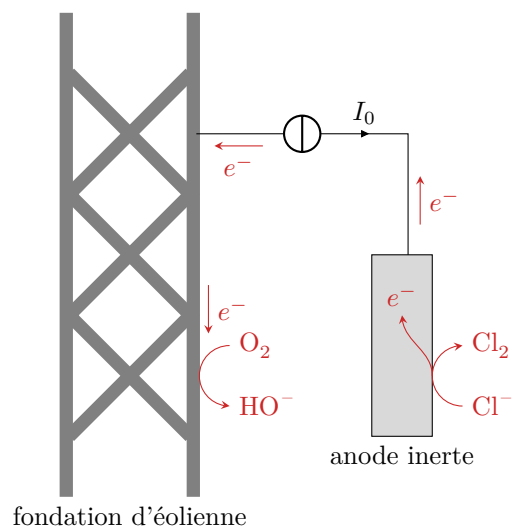


Figure 2 – Schéma de principe de la protection par courant imposé.